

“EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE LA EFECTIVIDAD DEL ADHESIVO EPÓXICO  
PARA REFORZAMIENTO DE VIGAS DE HORMIGÓN REFORZADO”

MANUEL ALEJANDRO AEDO HOLGUÍN

UNIVERSIDAD DEL VALLE  
FACULTA DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA  
SANTIAGO DE CALI, JUNIO 2013

“EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE LA EFECTIVIDAD DEL ADHESIVO EPÓXICO  
PARA REFORZAMIENTO DE VIGAS DE HORMIGÓN REFORZADO”

MANUEL ALEJANDRO AEDO HOLGUÍN

Tesis de grado para - optar o aspirar - al título de  
INGENIERO CIVIL

Director

PROF. CARLOS ALBERTO MADERA SIERRA, ING.

UNIVERSIDAD DEL VALLE  
FACULTA DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA  
SANTIAGO DE CALI, JUNIO 2013

## RESUMEN

Este trabajo de investigación se basa en la evaluación experimental de la efectividad del adhesivo epóxico utilizado para unir concretos de diferentes edades en reforzamiento de vigas de hormigón.

Se construyeron seis elementos vigas, (dos por cada caso) El proceso se realizó comparando 3 casos de vigas: Viga de sección  $B \times H$  reforzada fundida monolíticamente con concreto de resistencia  $F'_c$ , el segundo caso fue una Viga de sección  $b \times h$  no reforzada, para después de alcanzar su resistencia máxima  $F'_c$ , incrementar su sección a:  $B \times H$ , adicionando concreto e incorporando refuerzo, pero sin aplicar adhesivo epóxico y el último caso fue, Viga de sección  $b \times h$  no reforzada, para después de alcanzar su resistencia máxima  $F'_c$ , incrementar su sección a:  $B \times H$ , adicionando concreto e incorporando refuerzo, aplicando adhesivo epóxico.

En síntesis se llevaron los elementos a pruebas de flexión, los cuales arrojaron una serie de datos que fueron analizados para determinar la conveniencia o no de ejecutar la aplicación del adhesivo epóxico, para de esta manera medir su efectividad, al comparar los resultados de sus resistencias ultimas con las obtenidas de las vigas de igual sección pero fundidas de manera monolítica.

Para poder realizar este trabajo, se consultó la bibliografía existente respecto a la mecánica de vigas sometidas a flexión, así como las teoría de los adhesivos para este tipo de aplicación, y por último se consultó con los constructores que ha ejecutado actividades de saneamiento estructural, para que nos contaran cuales son las técnicas y procedimientos que más se usan en este tipo de obras.

Se concluyó, después de analizar los resultados que arrojaron pruebas de laboratorio, que el adhesivo epóxico utilizado como puente de adherencia es necesario para alcanzar la resistencia ultima de diseño, en el caso de reforzamiento por aumento de sección de vigas de hormigón.

## **TABLA DE CONTENIDO**

<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>5</b>
<b>1. PROBLEMA</b>	<b>7</b>
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.	7
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.	7
1.3. OBJETIVOS	8
1.3.1. OBJETIVO GENERAL	8
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	8
1.4. JUSTIFICACIÓN	9
1.5. ALCANCE	10
<b>2. MARCO DE REFERENCIA</b>	<b>11</b>
2.1. ANTECEDENTES	11
<b>3. METODOLOGÍA</b>	<b>24</b>
3.1. INVESTIGACIÓN SOBRE LOS MÉTODOS DE REFORZAMIENTO DE VIGAS	24
3.2. DISEÑO A FLEXIÓN.	31
3.3. DISEÑO A CORTANTE.	36
3.4. PROCESO CONSTRUCTIVO DE LOS MODELOS A ESCALA.	38
3.5. FUNDICIÓN DE VIGAS.	46
3.6. MONTAJE Y ENSAYOS DE LABORATORIO.	52
3.6.1. Montaje y pruebas a los cilindros de concreto	52
3.6.2. Montaje y pruebas a las vigas.	54

3.6.3.	Especificaciones de instrumentos	58
<b>4.</b>	<b>ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS</b>	<b>59</b>
4.1.	<i>PRESENTACION DE LOS RESULTADOS</i>	59
4.1.1.	Resultados de las pruebas a compresión de los cilindros.	59
4.1.2.	Resultados de las pruebas de tensión de las barras de acero	62
4.1.3.	Resultados de los ensayos de las vigas	64
4.2.	<i>COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS</i>	76
<b>5.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>78</b>
<b>6.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>81</b>
	<b>INDICE DE ILUSTRACIONES</b>	<b>84</b>
	<b>INDICE DE IMAGENES</b>	<b>86</b>
	<b>INDICE DE TABLAS</b>	<b>89</b>
	<b>INDICE DE GRAFICOS</b>	<b>90</b>

## INTRODUCCIÓN

En Colombia, existen numerosas edificaciones que fueron construidas previo a que las normas que regulan el diseño de elementos estructurales sometidos a cargas gravitacionales y sísmicas, fueran aplicadas y exigidas.

En la actualidad estas normas, son esenciales y es deber de todos los ingenieros calculistas aplicarlas en los diseños de estructuras sismoresistentes.

Con el objetivo de lograr estructuras antiguas que se acojan a la norma de seguridad actual, se deben aplicar técnicas para reforzar sus elementos estructurales, buscando que dichos elementos aumenten su resistencia y con ello sean más eficientes, a la hora de resistir los grandes esfuerzos que genera la inercia y la rigidez en el momento que actúa un sismo sobre dicha estructura.

Para lograr este objetivo se han implementado numerosos métodos de reforzamiento, los cuales implican que al intervenir los elementos ya endurecidos, tengamos que adicionarle concreto, ya sea para aumentar sus secciones o para incorporar refuerzos nuevos.

El presente trabajo investigativo pretendió mediante la realización evaluaciones mecánicas experimentales, analizar el efecto en la resistencia de la viga de concreto reforzada al aumentar su sección aplicando un puente de adherencia.

El proceso se realizó comparando 3 casos de vigas:

1. Viga de sección  $B \times H$  reforzada fundida monolíticamente con concreto de resistencia  $F'_c$ .
2. Viga de sección  $b \times h$  no reforzada, para después de alcanzar su resistencia máxima  $F'_c$ , incrementar su sección a:  $B \times H$ , adicionando concreto e incorporando refuerzo, pero sin aplicar adhesivo epóxico.
3. Viga de sección  $b \times h$  no reforzada, para después de alcanzar su resistencia máxima  $F'_c$ , incrementar su sección a:  $B \times H$ , adicionando concreto e incorporando refuerzo, aplicando adhesivo epóxico.

Finalmente se midió la resistencia última de los tres casos planteados y con los datos arrojados se logró concluir si con la aplicación de este aditivo se alcanza o supera la resistencia de una viga fundida monolíticamente (caso 1) y si es necesaria o no la aplicación de adhesivos (caso 1 y 2) los cuales inciden en el costo de la reparación y/o reforzamiento de estructuras.

## **1. PROBLEMA**

### **1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.**

A la hora de realizar reforzamiento por aumento de sección de una viga de concreto reforzado, es muy común la utilización de puentes de adherencia, los cuales se llevan a cabo a criterio de personas a cargo de la ejecución de la obra, esto sin tener en cuenta estudios o normas de construcción, que le garanticen al constructor la eficacia de estos productos.

Actualmente y debido que a no existe ningún estudio serio realizado sobre el uso de los puentes de adherencia en aumento de secciones de concreto, debido a la imposibilidad de extraer muestras del elemento que requiere el reforzamiento una vez este reforzado, la implementación de estos productos genera dudas a los constructores, en cuanto a que tan eficaz es la adherencia entre el concreto recién fundido y el concreto endurecido, para que no afecte la resistencia del elemento, utilizando este aditivo.

### **1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.**

¿Qué tan eficaz es la utilización de puentes de adherencia para el reforzamiento de elementos de hormigón reforzado al momento de aumentar la sección de una viga de concreto ya existente, encamisando su sección con concreto nuevo?



### **1.3. OBJETIVOS**

#### **1.3.1. OBJETIVO GENERAL**

Evaluar el comportamiento estructural de las vigas de concreto reforzado, reforzada por el método de aumento o encamisado de la sección, utilizando puentes de adherencia.

#### **1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Recopilar información de cómo se ejecutan las reparaciones o reforzamientos de estructuras, particularmente para el caso ~~se~~ de la viga de hormigón.
- Elaborar vigas con secciones iniciales las cuales será reforzadas aumentando su sección y compararlas con vigas de igual sección obteniendo resultados experimentales.
- Analizar bajo las teorías básicas el comportamiento mecánico de las vigas de concreto reforzado.
- Analizar y comparar los resultados arrojados por la evaluación del comportamiento mecánico de una viga reforzada utilizando el puente de adherencia, tomando como único dato su resistencia última.
- Realizar una comparación de los resultados experimentales con los resultados teóricos esperados.

#### **1.4. JUSTIFICACIÓN**

La ciudad de Cali, Valle del Cauca, según el documento NSR-10, está situada en una zona de alta amenaza sísmica, lo cual genera que las autoridades busquen afanosamente el saneamiento estructural de las edificaciones, que no fueron concebidas aplicando las normas que se imparten en este importante documento.

Un caso reciente se ejecutó en el Estadio de fútbol Pascual Guerrero, de la misma ciudad, el cual para lograr ser apto como sede del pasado mundial sub-20, debió ser intervenido, saneándolo estructuralmente, para que fuera un escenario seguro para las actividades que se llevarían a cabo.

Cuando se ejecuta una actividad de reforzamiento de una estructura, en este caso de un elemento de esa estructura preexistente, no hay manera de extraer muestras representativas, por la imposibilidad de retirar el elemento estructural, lo que imposibilita tener datos que concluyan, si lo que fue planteado en el diseño del reforzamiento, fue alcanzado en la práctica.

Lo anterior condujo a buscar un método para evaluar si es necesaria la utilización de los puentes de adherencia utilizados para unir concretos de diferentes edades, lo cual de no ser necesario, representaría un ahorro en los recursos necesarios para la ejecución de este tipo de patrimonio representado en la viejas edificaciones existentes en la ciudad que no cumplen las normas sismoresistentes y que requieren urgentemente un saneamiento estructural.

### **1.5. ALCANCE**

El presente trabajo investigativo pretende comparar los resultados de resistencia ultima a flexión y cortante, obtenidos en una viga de sección inicial, incrementando su sección transversal, utilizando: en un caso un puente de adherencia comúnmente utilizado en el reforzamiento de elementos estructurales y en otro sin la utilización de este adhesivo; con la resistencia ultima a flexión y cortante de una viga de igual sección a la alcanzada con el encamisado del caso 1 y 2, pero fundida monolíticamente, mediante ensayos de laboratorio.

## 2. MARCO DE REFERENCIA

### 2.1. ANTECEDENTES

Es importante aclarar que al momento de realizar la búsqueda de antecedentes es muy poco lo que se puede encontrar, referente a presente tema de investigación, en los documentos revisados de distintos autores siempre se deja abierta la posibilidad de que el constructor tenga autonomía para decidir cómo realizara el reforzamiento.

Como primera referencia, la **NSR – 10** en el numeral **A.10. 9** indica: “*a continuación se establecen los requisitos que se deben cumplir en la intervención de estructuras de edificaciones que deben ser reforzadas o actualizadas a la presente versión del Reglamento*” (NSR-10 (Colombia), 2010) al analizar este numeral se encuentra que no es explícito en indicar una metodología para el reforzamiento de estructuras y los efectos de usar o no usar puentes de adherencia que tengan efecto sobre la transmisión de esfuerzos.

Los ingenieros que utilizan adhesivos epóxicos en aplicaciones de reforzamiento externo, se encuentran con el reto de la innovación, observando que actualmente no existen reglas claras para el diseño de elementos de concreto (vigas o columnas) reforzadas, aplicando puentes de adherencia para unir concretos de diferentes edades. (Castillo Escallon , y otros, 2010)

El Instituto Americano del Concreto (ACI) comité 440-F desarrolló un documento (ACI 440F- 99,1999) para proporcionar recomendaciones de diseño y técnicas de

construcción para el uso de aditivos adherentes para el reforzamiento de estructuras concreto. Sin embargo está por definirse una metodología explícita para uso apropiado de factores de seguridad, baja ductilidad, anclajes, etc. Dejando a criterio del constructor de cómo debe realizarlas. (Instituto americano del concreto, 1999)

El manual técnico de construcción publicado por SIKa incorpora un adhesivo epóxico el cual garantiza una perfecta adherencia entre concreto fresco y concreto endurecido cumpliendo con las especificaciones de adherencia, según ASTM C 881-90 tipo II, V, Grado 2, Clase B y C. Adicionalmente presenta una serie de recomendaciones para su aplicación: *"La superficie debe estar sana y limpia, libre de partes sueltas, contaminación de aceites, polvo, residuos de curadores, lechada de cemento u otras sustancias extrañas."* (SIKA, 2013)

## MARCO TEÓRICO

### Teoría del diseño a flexión y cortante en vigas.

Para el diseño de las viguetas se utilizará la teoría de la flexión y cortante en vigas, la cual es muy importante para conocer que cargas iba a soportar el elemento antes y durante la falla, y realizar el diseño adecuado para asegurar un tipo de falla dúctil.

## *FLEXIÓN EN VIGAS (método de las cargas de servicio)*

Para el tipo de diseño que atañe a esta investigación se incluirán las cargas sin mayorar y los esfuerzos cuyos valores calculados no excedan ciertos límites para cada tipo de esfuerzos solicitados. En este método los esfuerzos calculados son comparados con valores admisibles con el fin de que el comportamiento del elemento este dentro del rango elástico.

*Sección Transformada:* Se inició este tipo de diseño considerando una sección transformada, que es utilizada para calcular las propiedades geométricas de una sección que contiene más de dos materiales (en este caso concreto y acero a flexión) donde las propiedades geométricas que se requieren son el momento de inercia y la ubicación del eje neutro de tal sección para obtener los esfuerzos a los cuales es sometida la sección transversal y el cálculo de deflexiones y agrietamiento.

Para esta sección se utiliza un factor denominado relación modular la cual nos facilitará el trabajo y tener una sección transformada en términos de un solo material, para el caso de este diseño se obtendrá toda la sección en términos del concreto.

$$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{E_s}{E_c}$$

Por lo tanto el área total de la sección transformada para concreto y acero estaría definida por la siguiente expresión.

$$At_1 = Ac_t = (A_1 + nA_2) = (A_c + nA_s)$$

*Sección No Agrietada:* La sección agrietada es una sección transformada en la cual se considera que toda la sección está trabajando y que el concreto es un material deformable elásticamente tanto para tensión como a compresión. Se toma el módulo de rotura para el concreto como:

$$f_{ct} = Mr = 0,7 * \sqrt{f'_c}$$

En primer lugar obtenemos el área total de la sección en términos del material uno (concreto).

$$At_1 = Ag + (n - 1) * As$$

La profundidad del eje neutro es:

$$Y_c \text{ (area a compresion)} = \frac{Ag * \left(\frac{h}{2}\right) + (n-1) * As * d}{At_1}$$

$$Y_t \text{ (area a traccion)} = h - Y_c - \text{Recubrimiento}$$

Luego se realiza el cálculo del momento de inercia:

$$I_t = \frac{bw * h^3}{12} + \left( Ag * \left( \frac{h}{2} - Y_c \right)^2 \right) + (n - 1) * As * (d - Y_c)^2$$

Con los datos anteriores se puede calcular el momento máximo del elemento, inferior a los esfuerzos de rotura  $f_r$ , donde no se presentan grietas a flexión y está dado por la siguiente expresión:

$$M_{ct} = \frac{f_{ct} \cdot I_t}{Y_b}$$

Por último se obtiene la carga crítica para considerar el concreto como un material deformable tanto para compresión como a tensión, para el caso de la mitad de la carga aplicada en los dos tercios centrales.

$$P_{cr} = 6 * \frac{M_{cr}}{L} - \frac{3 * W * d * L}{4}$$

*Sección Agrietada:* Para esta sección se tiene que el concreto ya se ha agrietado debido a esfuerzos de tensión y por esto solo toma esfuerzos de compresión en el concreto y solo esta área será considerada como parte de la sección transformada. Para hallar la profundidad del eje neutro de esta sección se debe igualar los momentos de área de compresión y tensión, despejando  $Y$ . Entonces, se tiene la siguiente ecuación cuadrática para calcular  $Y_c$ :

$$\frac{bw * Y_c^2}{2} + Y_c * n * A_s - n * A_s * d = 0$$

El valor de la inercia de la sección transformada es:

$$I_t = \frac{bw * Y_c^3}{3} + n * A_s * (d - Y_c)^2$$



Luego de esto se puede obtener los esfuerzos admisibles para el concreto y el acero teniendo en cuenta que se tomara un 45% para el esfuerzo admisible del concreto y 50% para el esfuerzo admisible del acero, esto para obtener un diseño satisfactorio ya que los esfuerzos encontrados deben ser menores a ciertos valores admisibles para el concreto y el acero. Por lo tanto:

$$f'_{cadm} = 0.45 * f'_c$$

$$f_{yadm} = 0.5 * f_y$$

Cálculo de momentos para el concreto y acero:

$$M_c = \frac{f'_{cadm} * I_t}{y}$$

$$M_s = \frac{f_{yadm} * I_t}{y_b}$$

Por último, calculamos las cargas que va soportar el concreto y el acero a compresión y tensión respectivamente:

$$P_c = \frac{6 * M_c}{L} - \frac{3 * W_d * L}{4} \qquad P_s = \frac{6 * M_s}{L} - \frac{3 * W_d * L}{4}$$

*Método de la resistencia última:* El método de resistencia última es el otro parámetro que se utilizará y en el que se basará todo el diseño de los elementos. Este método se fundamenta en el comportamiento de los elementos estructurales bajo cargas de falla, por lo tanto no admite conceptos elásticos.

Para el análisis y diseño mediante el método de resistencia última, se tendrá en cuenta que son modelos reducidos con un factor de escala descritos anteriormente, se utilizará una cuantía de acero entre 0.5 y 0.75 de la cuantía balanceada para con esto obtener el bloque de compresiones ( $a$ ) y calcular el momento nominal el cual nos dará la carga última que soportará el elemento y así poder asegurar el tipo de falla que se requiere. Se inicia este diseño teniendo previamente la cuantía de acero que se utilizará:

$$\rho = \frac{A_s}{b_w * d}$$

Con esto calculamos la distancia del modelo más usado para predecir la resistencia última el bloque de compresión:

$$a = \frac{\rho * f_y * d}{2 * \beta_1 * f'_c}$$

Luego de lo anterior, se puede obtener el momento nominal expresado por la ecuación:

$$M_n = \rho * f_y * b_w * d^2 * \left(1 - \frac{0.59 * \rho * f_y}{f'_c}\right)$$

Y por último, se obtiene la carga que soporta el elemento hasta llegar a la falla:

$$P_n = P_u = \left(\frac{6 * M_n}{L} - \frac{3 * W * d * L}{4}\right)$$

#### DISEÑO A CORTANTE:

Como se ha mencionado anteriormente en repetidas ocasiones, el diseño de las vigas consiste en proyectar una falla que avise previamente, por tal razón preponderadamente el diseño es a flexión con base a secciones sub reforzadas que muestra fisuras y deformaciones excesivas antes de la falla.

*Vigas con Armadura Transversal:* Para este proyecto fue necesario realizar un diseño teniendo en cuenta los esfuerzos cortantes y se requirió una armadura transversal para cada uno de los modelos a ensayar, debido a que solo el concreto no está en capacidad de contrarrestar la tracción diagonal.

Para determinar la resistencia al corte, el análisis se fundamentó en las siguientes formulas:

$$V_u = V_c + V_s$$

Donde es el esfuerzo nominal del concreto y es el esfuerzo resistente del acero a cortante, y se calcula como:

$$V_c = 0,17 * \lambda * \sqrt{f'_c} * bw * d$$

Donde  $\lambda$  es igual a 1 para concretos de peso normal.

$$V_s = \frac{A_v * f_y * d}{s}$$

Por último se calcula carga última por cortante.

$$P_u = 2V_u - \frac{W_d * L}{2}$$

### TIPOS DE ADHESIVOS

Los adhesivos han sido utilizados en la industria de la construcción desde tiempos arcaicos, dada la necesidad de juntar o unir diferentes tipos de materiales. La historia refiere que se usaron los adhesivos desde los tiempos de los antiguos egipcios, asirios y griegos.

Los egipcios usaron los adhesivos para pegar el papiro, y se han encontrado muebles recubiertos con una película de madera en las tumbas de algunos de los faraones. Estos adhesivos eran indudablemente de origen animal.

Los asirios no solo construyeron con el tabique de barro, el material moldeado de construcción más antiguo que se conoce, sino que en muchos casos pegaron sus adobes con un mortero cementante, a base de arcilla.

Los mismos asirios descubrieron mantos bituminosos cerca del río Éufrates y usaron la brea como material cementante. Los griegos fueron los pioneros de la construcción revestida, construyeron algunas estructuras de caliza que luego formaron un mármol de granito fino, el mármol fue colocado con un mortero.

Los primeros romanos también revestían construcciones con productos similares al concreto. Los chinos usaron morteros en sus obras estructurales y pegamentos animales en sus obras decorativas de construcción. (Archila Ortiz, 2007)

## Adhesivos Estructurales

Los adhesivos epóxicos son normalmente bi-compuestos por resinas más activadores. Una vez premezclados la polimerización comienza lentamente, por lo que deben ser aplicados sobre las piezas a unir y mantener los sustratos en posición hasta alcanzada la resistencia requerida. (López Corona, 2008)

Los productos epóxicos se presentan en dos o más elementos. Las resinas y el endurecedor forman el sistema básico del material, mientras que el resto de los componentes son adiciones inertes para características determinadas y específicas.

La resina es el adhesivo en sí, mientras que el endurecedor permite la reactividad y reticulación de las moléculas para formar la malla de pegado en el producto. Se emplean, por ejemplo, en mezclado de cemento, colocación de anclajes y conectores en fundiciones, y en elementos de concreto armado en construcción de puentes. (Archila Ortiz, 2007)

Lo que mejor define a esta clase de productos, es la capacidad de adherir casi todos los materiales de construcción, independiente de las resistencias mecánicas, por eso son muy usados en refuerzos estructurales.

Los epóxicos tienen más de cincuenta años, pero el avance tecnológico en este campo es continuo; actualmente se trabaja en productos que tengan características determinadas como la aplicación bajo agua o resistencia a bajas

temperaturas y en especial la rapidez en el pegado. (Padilla Ramirez, y otros, 2007)

Los epóxicos empleados en aplicaciones estructurales deben ser curados a temperaturas altas o a temperatura ambiente con post-curado por calor. (SIKA, 2013)

Las resinas epóxicos que se usan con este fin, deben cumplir con las especificaciones de la norma ASTM C-881-90 (Especificaciones para sistemas de adherencia para concreto a base de resinas epóxicos). Estos materiales pegarán superficies mojadas o húmedas. Con ellos es posible adherir metal, piedra y/o madera con el concreto. (ASTM, 1990)

#### Puentes de adherencia

Esta es una de las líneas más importantes en las que se puede encontrar el adhesivo epóxico. El principio del producto consiste en darle continuidad al proceso de fundición de una obra en construcción, porque este no se puede hacer de una forma continua y con este producto se pueden transmitir esfuerzos garantizando que la efectividad del reforzamiento por el método de aumento de sección de elementos de concreto reforzados sometidos a esfuerzos de flexión y cortante. (SIKA, 2013)

### Anclajes y reparaciones

Esta es otra de las aplicaciones más frecuentes en las que se utilizan los adhesivos epóxicos, se observan en anclajes y reparaciones industriales por ejemplo en las estructuras dañadas por sismos. Sus usos van desde la inyección de grietas, la unión entre concretos hasta rellenos en general. Son utilizados también en el campo de pilotes para la vinculación de micropilotes con estructuras, cabezales y zapatas. Aquí lo importante es la alta resistencia, facilidad de preparación y colocación. ( Oviedo Sarmiento, 2009)

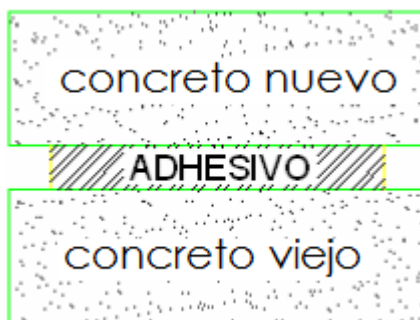


Ilustración 2.2-1

### REFORZAMIENTO VIGAS DE CONCRETO

Las vigas de concreto armado pueden ser reforzadas dándoles un recubrimiento adicional de concreto, el cual debe estar de acuerdo al diseño. Se colocan nuevos estribos fijados con expansor de anclaje de base poliéster. El acero longitudinal debe estar embebido en concreto y anclada a las columnas.

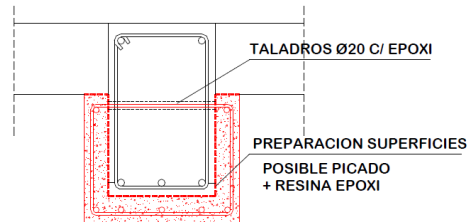


Ilustración 2.2-2

El concreto compactado debe ser colocado cuidadosamente para asegurar que no existan fallas y que no existan puntos débiles. Se debe vaciar por un solo lado de la viga hasta que aparezca del otro lado, evitándose la formación de bolsas de aire.

Además, se debe utilizar vibrador de concreto para una adecuada compactación. La transmisión de esfuerzos se puede lograr adecuadamente con el uso de aditivos, nuestro caso, se aplican resinas epóxicas.



### **3. METODOLOGÍA**

#### **3.1. INVESTIGACIÓN SOBRE LOS MÉTODOS DE REFORZAMIENTO DE VIGAS**

En general, el refuerzo de vigas a flexión se realiza incrementando fundamentalmente su capacidad resistente frente a cargas externas. Tal incremento se traduce en un refuerzo global a flexión y cortante con base a criterios de redistribución plástica, de la ley de equilibrio de momentos de la viga en cuestión.

El motivo para actuar preferentemente frente a momentos positivos, radica en las dificultades constructivas que se plantean para dar continuidad a través del nudo viga-soporte a un refuerzo dispuesto frente a momentos negativos. Obviamente en determinados casos (vigas de cubierta, vigas planas de ancho suficientemente superior al del soporte, etc.) dichas dificultades pueden ser salvadas y actuar simultáneamente frente a flexión 'negativa' y 'positiva'. Sin embargo, por razones de limitación de tiempo y espacio, tales actuaciones no se consideraron explícitamente en este trabajo.

En el amplio abanico de métodos de reforzamiento de vigas, se consultó a varios constructores con experiencia en reforzamiento de vigas, entre los que se destacan los ingenieros encargados de realizar el reforzamiento del estadio pascual guerrero, en cabeza del ingeniero Jaime Hernando Suarez Director de proyecto.

A continuación se exponen los métodos que los constructores utilizaron en el reforzamiento de dicha estructura entre otros:

#### Refuerzos mediante la adición de hormigón armado

Un método muy eficaz para el refuerzo a flexión consiste en aumentar la sección transversal de la viga original mediante una sección adicional de hormigón convenientemente armado. En general el refuerzo se efectúa aumentando inferiormente la sección de la viga original por las razones comentadas en el apartado anterior. En función de la armadura adicional que se disponga, ello permite incrementar considerablemente la capacidad frente a flexión positiva. Además, si el aumento de sección se prolonga hasta los apoyos, se incrementa también la capacidad frente a flexión negativa al aumentar el brazo mecánico de la armadura superior originalmente existente.

En algunos casos puede también plantearse aumentar superiormente la sección de la viga, especialmente si se ha incrementado también el refuerzo de hierro.

El refuerzo mediante aumento de sección inferior es más efectivo en vigas, entonces es posible envolver la sección original tanto por la base como por los laterales, creando una camisa de hormigón, en la que se aloja una armadura adicional longitudinal y transversal. De este modo, dependiendo de la proporción de la sección, es posible no sólo incrementar la capacidad flectora sino también la resistencia a cortante.

Esta solución requiere la conexión directa de las armaduras longitudinales original y de refuerzo, para lo cual deben disponerse horquillas convenientemente soldadas a unas y otras, según el ingeniero Suarez.

Para el caso de la obra de reforzamiento del estadio pascual guerrero, los constructores emplearon este método para el reforzamiento de vigas antiguas, y para lograrlo emplearon los siguientes pasos:

- Escarificar (picar) la capa inferior de la viga de hormigón, para lo cual se utiliza taladro demoledor hasta llegar al refuerzo viejo y luego se limpia la superficie con sandblasting.

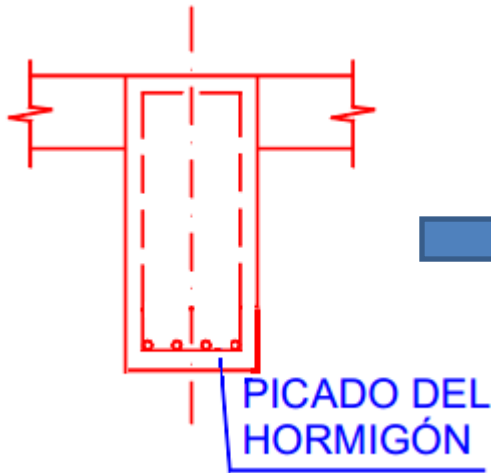


Ilustración 3.1-1

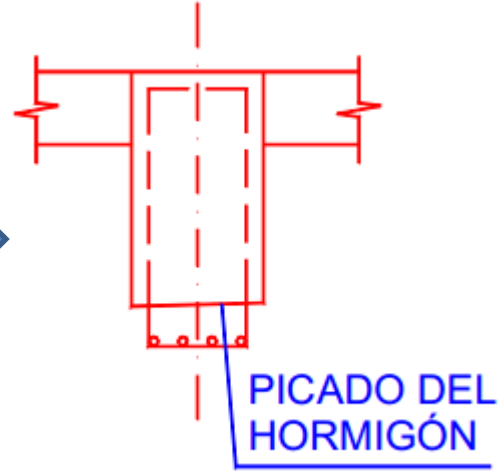
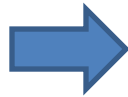


Ilustración 3.1-2

- Se procede a realizar unas perforaciones para anclar los nuevos estribos que sean capaces de absorber los esfuerzos de desgarramiento entre en hormigón antiguo y el nuevo.

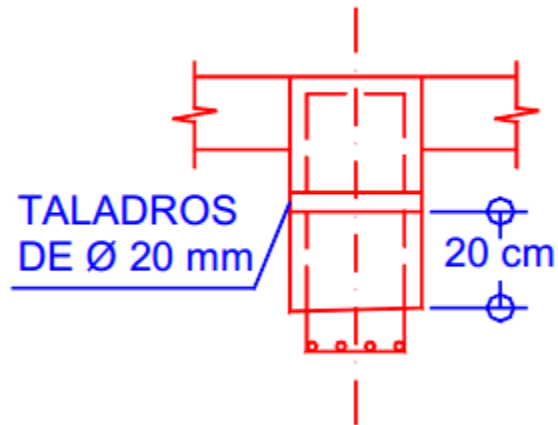


Ilustración 3.1-3

- Crear una buena unión entre el concreto viejo y el concreto nuevo, para esto se utilizan puentes de adherencia y epóxicos para realizar los anclajes.

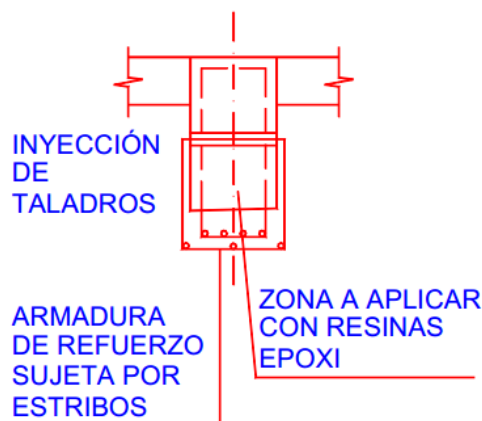


Ilustración 3.1-4

- Una vez se tengan anclados los nuevos estribos se colocan los refuerzos longitudinales y después de aplicar los puentes de adherencia se procede a encofrar y vaciar la mezcla de concreto.

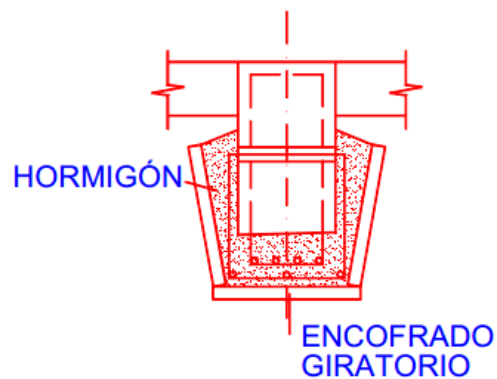


Ilustración 3.1-5

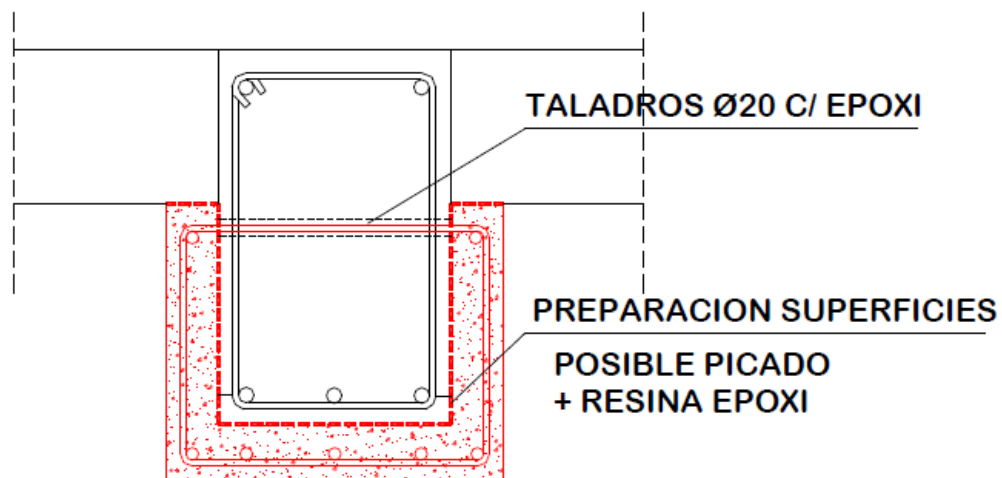


Ilustración 3.1-6

Según los constructores, este sistema tiene el problema de exigir un incremento considerable de las dimensiones de la viga original. A nivel constructivo, la fundición de la 'camisa' presenta cierta complejidad. Una alternativa consiste en realizar taladros en el forjado desde los que se inyecta el hormigón.

La dosificación debe ser muy cuidadosa y controlada, garantizando una buena adherencia con el material original, y evitando la formación de hormiguelo. También es posible el aumento de sección con morteros específicos para el refuerzo y reparación, cada vez más generalizados.

La transferencia de esfuerzos cortantes entre viga original y refuerzo se confía a veces a la junta hormigón-hormigón con algún tipo de tratamiento, dado que la superficie de contacto entre ambos es de cierta importancia. Sin embargo, este método puede resultar peligroso cuando la viga no queda suficientemente empotrada en sus extremos, o la cuantía del refuerzo es considerable.

En todas las circunstancias los constructores manifestaron haber usado puentes de adherencia o epóxicos, e incluso a picar parcialmente el recubrimiento de la viga original, para conectar sus armaduras con las del refuerzo. Este último procedimiento, debidamente planteado y ejecutado reduciría al mínimo los problemas de transferencia y permite alcanzar importantes niveles de refuerzo, incluso en vigas planas.

Eventualmente, el sistema puede complementarse introduciendo armadura de compresión de refuerzo. Para ello existen tres opciones: fundir bandas de acero,

aumentar la sección de la viga con hormigón armado, o picar el recubrimiento para introducir la armadura adicional. En este último caso, debe analizarse el alcance de la operación ya que, salvo descarga o apeo, el picado del recubrimiento afecta a una zona comprimida de hormigón y consecuentemente, reduce temporalmente la seguridad de la zona afectada. Análogas consideraciones se deberán efectuar al reponer dicho recubrimiento.



Ilustración 3.1-7 Refuerzo a flexión mediante bandas de acero encolado

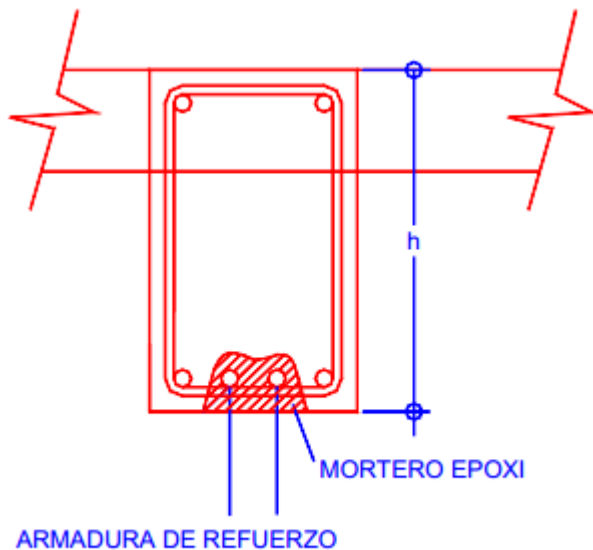


Ilustración 3.1-8 *Introducción de armadura adicional*

### 3.2. DISEÑO A FLEXIÓN.

Para el diseño del reforzamiento, se realizaron los cálculos de la viga, como si se fundiera monolíticamente, es decir se consideraron las medidas finales después del aumento de la sección, teniendo como medidas, una vez aplicado el factor de escala, una viga de 10x17cm y una luz de 90cm la cual es mayor que 4 veces la base del elemento (C.21.5.1.2 NSR-10)–(NSR-10 (Colombia), 2010) cumpliendo con la norma sismoresistente vigente.

El refuerzo longitudinal comprende una varilla de refuerzo de 3/8" con estribos de grafil 5mm.



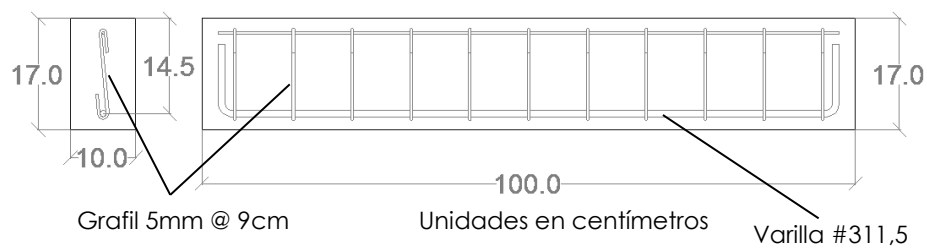


Ilustración 3.3-1 Viga ideal

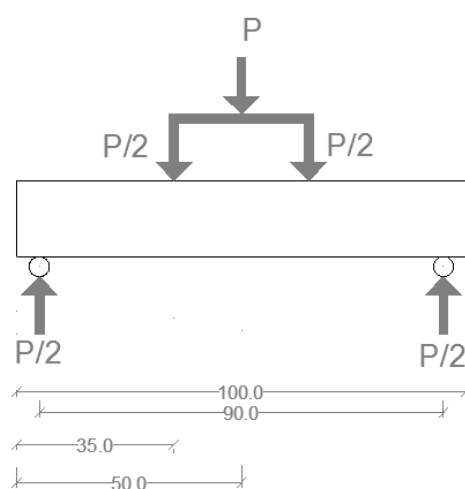


Ilustración 3.3-2 Esquema de cargas aplicadas

Diagramas de momentos y cortantes

Diagrama de momento

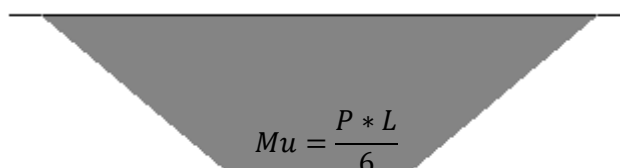


Ilustración 3.3-3 Diagrama de momentos

Diagrama de momento



Ilustración 3.3-4 *Diagrama de cortantes*

Consideraciones iniciales para los cálculos

$$f'c = 237 \text{ Kg/cm}^2$$

$$fy = 4.200 \text{ Kg/cm}^2$$

$$fct = Mr = 34,08 \text{ Kg/cm}^2$$

$$As = 0,71 \text{ cm}^2$$

$$Ag = 170 \text{ cm}^2$$

$$Ec = 15.100 * \sqrt{f'c} = 192.435,05 \text{ kg/cm}^2$$

$$Es = 2.000.000 \text{ kg/cm}^2$$

$$Wd = 0.408 \text{ Kg /cm}$$

$$n = 10,939$$

Inicialmente se analiza con el método de cargas de servicio, esto significa no afectarla por los coeficientes de sobrecarga o reducción usados en el siguiente método del análisis, en el cual se calcula una sección no agrietada y una sección agrietada, en este método los esfuerzos calculados son comparados con valores admisibles con el fin de que el comportamiento general de la estructura este dentro del rango elástico.

#### Sección No Agrietada.

Para este caso, calcularemos el área de la sección transformada teniendo en cuenta la relación modular  $n$ , la cual dio como resultado así:

$$A_{t1} = 176,7 \text{ cm}^2$$

Con esto se tendrá la ubicación del eje neutro ( $Y_t$ ) de la sección, el cual es necesario para poder calcular el momento de inercia  $I_t$  y el momento crítico  $M_{cr}$  que soporta la sección, con este momento se puede obtener la carga crítica que resiste la vigueta sin presenta grietas o fisuras en el concreto.

$$Y_c = 8,75 \text{ cm} \rightarrow I_t = 4.355,67 \text{ cm}^4 \rightarrow M_{cr} = 17.993,33 \text{ Kg} * \text{cm}$$

$$P_{cr} = 1.172,02 \text{ Kg o } 11,7 \text{ KN}$$

## Sección agrietada.

En la sección agrietada se considera que el concreto no resiste esfuerzos de tensión y por eso solamente resiste esfuerzos de compresión, al igual que en la sección anterior se debe calcular el eje neutro para así obtener el momento de inercia  $I_t$ .

$$Y_c = 4,13\text{cm} \rightarrow I_t = 930,60 \text{ cm}^4$$

Los esfuerzos utilizados para el acero y el concreto son los admisibles para cada uno, con los cuales se hallan los momentos a compresión del concreto  $M_c$  y a tracción del acero  $M_s$  y finalmente determinar las cargas que soportan el concreto y el acero.

$$f_c(\text{adm}) = 106,65\text{kg/cm}^2$$

$$f_y(\text{adm}) = 2100 \text{ kg/cm}^2$$

$$M_c = 24.031,04 \text{ Kg} \cdot \text{cm}$$

$$M_s = 179.784,20 \text{ Kg} \cdot \text{cm}$$

$$P_c = 1.574,53 \text{ Kg}$$

$$P_s = 11.958,07 \text{ Kg}$$

## Resistencia Última (Diseño a la rotura).

El método de resistencia última es el otro parámetro que se utilizará y se basará todo el diseño de los elementos, este método se fundamenta en el comportamiento de los elementos estructurales bajo cargas de falla, por lo tanto

no admite conceptos elásticos. Para el análisis y diseño mediante el método de resistencia ultima, se tendrá en cuenta que son modelos reducidos con un factor de escala descritos anteriormente, se utilizará una cuantía de acero entre 0.5 y 0.75 de la cuantía balanceada para con esto obtener el bloque de compresiones y calcular el momento nominal el cual nos dará carga ultima que soportará el elemento y así poder asegurar el tipo de falla que se requiere.

$$\rho = 0,00473$$

$$\rho_b = 0,02125$$

$$\rho_{min} = 0,0033$$

$$\rho_{max} = 0,0159$$

$$\rho_{min} < \rho < \rho_{max}$$

$$R_n = 19,45 \text{ Kg/cm}^2$$

$$M_n = 65.002,56 \text{ Kg} \cdot \text{cm} \rightarrow P_n = P_u = 4.305,96 \text{ Kg}$$

### 3.3. DISEÑO A CORTANTE.

Es necesario realizar un diseño a cortante para que los elementos que estarán sometidos por este tipo de cargas se diseñen para resistir cargas mayores a las que producen la flexión, debido a que como se comentó anteriormente, la

finalidad es diseñar elementos que avisen previamente antes de la falla, con el método anterior de la resistencia ultima preponderadamente diseñados a flexión en base a secciones sub-reforzadas que muestran fisuras y deformaciones antes de la falla.

$$v_c = 357,21 \text{ Kg}$$

$$A_v = 0,196 \text{ cm}^2$$

Para el área del acero de refuerzo a cortante se utilizó acero de grafil con un diámetro de 4mm.

Calculando el espaciamiento requerido entre estribos, se obtiene que:

$$S = 9 \text{ cm}$$

El esfuerzo resistido por el acero es

$$v_s = 1.328,63 \text{ Kg}$$

Por último, se calcula la carga última a cortante que soportará el elemento.

$$V_u = 1.685,84 \text{ Kg}$$

$$P_u = 3.353,33 \text{ Kg}$$

El diseño arroja una configuración de la armadura transversal de 10 estribos en “J” y “S” espaciados a 9 cm uno del otro y comenzando y terminando su colocación 5 cm después y antes del apoyo respectivamente.

### **3.4. PROCESO CONSTRUCTIVO DE LOS MODELOS A ESCALA.**

#### Diseño de mezcla de concreto.

Según lo investigado en campo y los conocimientos adquiridos durante el desarrollo del pregrado, se realizó un diseño de mezcla para poder garantizar que el concreto elaborado alcanzara las resistencias un concreto que a los 28 días alcance una resistencia de 210 Kg/cm<sup>2</sup>.

En el laboratorio de suelos y pavimentos de la Escuela de Ingeniería Civil y Geomática de la Universidad del Valle, se realizaron cada una de las pruebas (granulometría, gravedad específica y absorción) a los agregados seleccionados para ser utilizados en la mezcla del concreto, a partir de esto se obtuvieron unos resultados los cuales se ingresaron a un programa diseñado para obtener la dosificación del concreto hidráulico requerido para este proyecto.

## Armadura y Formaleteado

*Viga sin refuerzo (5x12x100cm):*

Inicialmente se fundieron las vigas de 5x12cm, las cuales no llevarían refuerzo, y serían las que se aumentan en su sección, adicionándoles refuerzo y llevándolas a una nueva sección de 10x17cm.

La cantidad de vigas fundidas en este caso fueron 4 unidades: 2 para el caso al cual no se aplicó el puente de adherencia y 2 para el caso donde se colocara el puente de adherencia, procediendo a elaborar las formaletas en con las medidas mencionadas en el título del párrafo.



Imagen 3.5-1 *Formaleta viguetas a reforzar*





*Imagen 3.5-2 Fundición viguetas a reforzar*

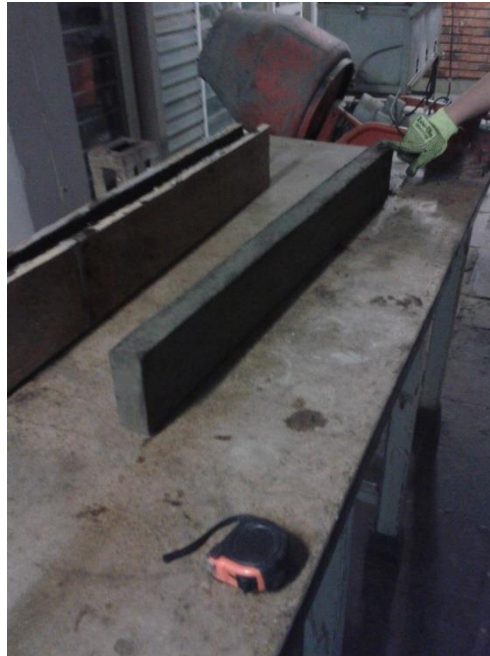


Imagen 3.5-3 Viguetas a reforzar

*Viga con refuerzo fundida monolíticamente (10x17x100cm)*

Paralelamente, se fundieron las vigas monolíticas con refuerzo de sección 10x17cm con las cuales compararemos los casos de refuerzo, para lo cual será nuestra viga VR.

Para este caso, el acero de refuerzo será el resultado del diseño previo de los elementos, utilizando varilla de 9.5 mm como refuerzo a tracción y una varilla de 4 mm como refuerzo de confinamiento.

Para el caso la viga de 10x17cm utilizaremos varilla corrugada.

Las varillas de refuerzo longitudinal se seccionaron con una longitud de 115 cm, donde se tiene 95 cm de zona recta, para cubrir la longitud de desarrollo para el elemento y ganchos a cada lado de 10 cm requeridos por la NSR-10, para evitar un deslizamiento de la varilla.

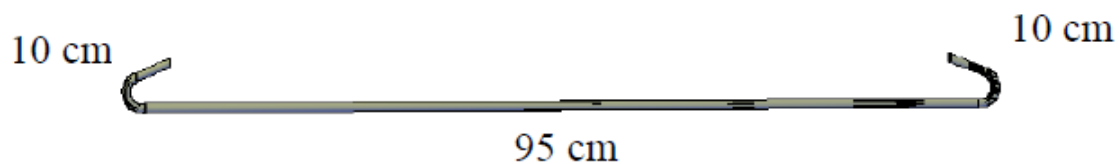


Ilustración 3.5-1

Para el refuerzo transversal, se cortaron 22 flejes en "S" de varilla de 4mm de diámetro corrugado, 13 cm en la parte central, 2cm en cada curva y ganchos de 3 cm para un fleje de 23cm, teniendo como recubrimiento los 2cm planteados en la parte superior e inferior del elemento.

Los flejes se amarraron a la barra longitudinal a tracción con alambre negro y se espaciaron cada 9cm iniciando a los 5cm de cada extremo, teniendo lista la formaleta de 10x17x100cm con el refuerzo instalado (Ilustración 3.5-2), para la correspondiente fundición. Fue necesario utilizar una varilla de 6,4mm o #2 en la parte superior para garantizar la estabilidad de los flejes.

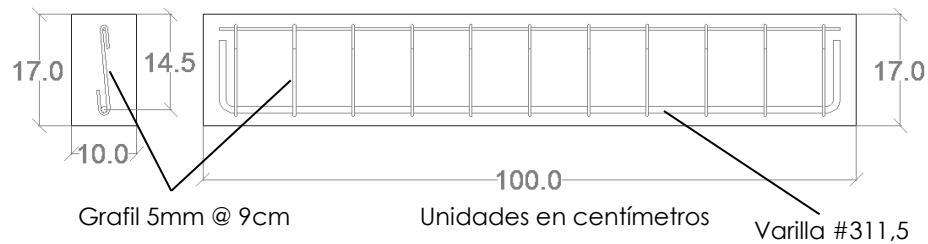


Ilustración 3.5-2



Imagen 3.5-4 Formaleta viga ideal reforzada (VR-1 y 2)

*Viga con refuerzo para posterior aumento de sección (10x17x100cm)*

Esta formaleta se elaboró pasado los 28 días donde la viga de 5x12 alcanzo su resistencia máxima, y adicionalmente se esperó 20 días más, dejando la viga a la intemperie para simular el efecto de envejecimiento de una viga que este en servicio. Se procedió a colocar la viga endurecida (5x12x100cm) dentro de la formaleta dejándola en el fondo después de realizar las perforaciones a una

profundidad de 8 cm, en los extremos a una distancia de 2 cm para anclar los ganchos del refuerzo a tracción y el arranque de los estribos a los 5 cm de cada extremo, concluyendo las 11 perforaciones.

Se armó el refuerzo respetando las distancias del diseño y se procedió a instalar los anclajes en cada perforación, previo a la instalación de Sikadur®AnchorFix-4 el cual es un sistema epóxico de dos componentes, 100% sólidos insensible a la humedad y tixotrópico (no escurre), que una vez mezclados los componentes se obtiene una pasta suave de gran adherencia y resistencia mecánica para los anclajes necesarios.

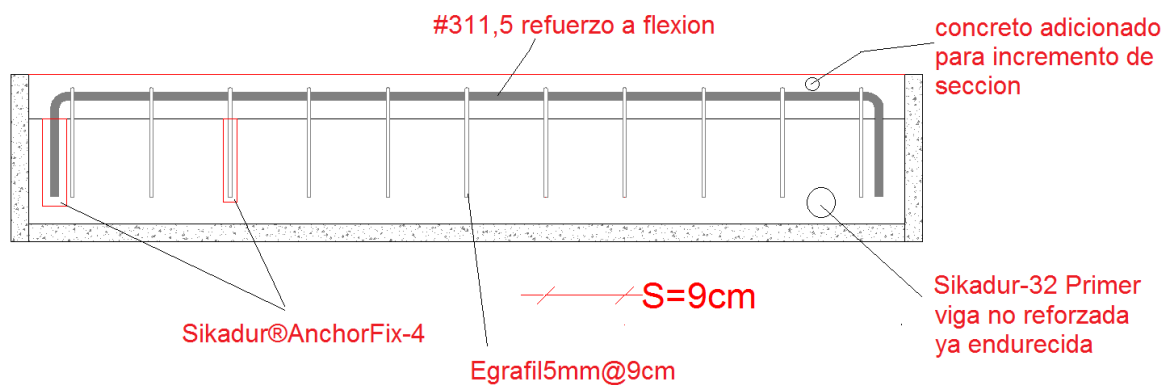


Ilustración 3.5-3



Imagen 3.5-5 Vigas a reforzar

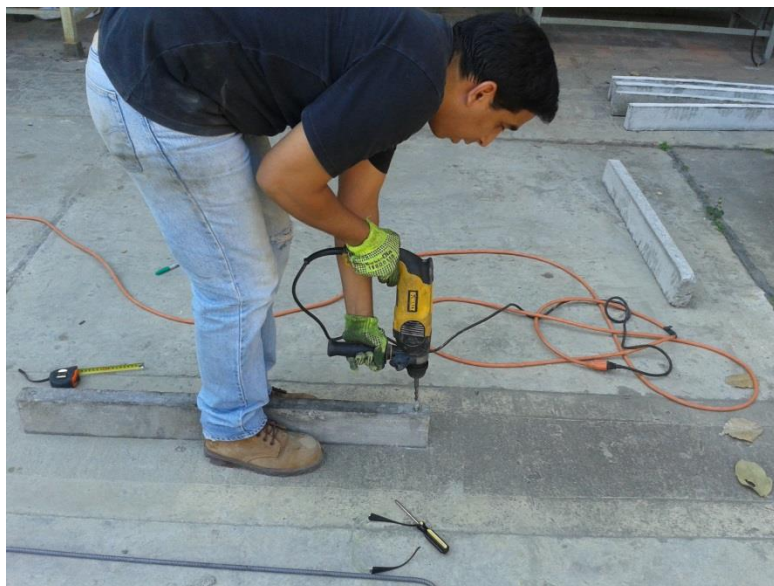


Imagen 3.5-6 Vigas a reforzar anclajes





Imagen 3.5-7 Vigas a reforzar refuerzo

### 3.5. FUNDICIÓN DE VIGAS.

*Viga sin refuerzo (5x12x100cm)*

La fundición de esta y las otras vigas se llevó a cabo en el patio de la Escuela de materiales de la Universidad del Valle, midiendo asentamiento, realizando el correcto vibrado y extrayendo las respectivas muestras (3 en total para las seis vigas) en los cilindros de 15 cm de diámetro por 30 cm de altura, los cuales se fallaran a los 28 días para después promediarlas, dejando fundidas las seis vigas

que se requieren para las pruebas y dejándolas fraguar y posteriormente curar, sumergiéndolas en las pilas con agua del mencionado patio.

*Viga con refuerzo fundida monolíticamente (10x17x100cm)*

De manera paralela se fundieron las dos vigas VR-1 y VR-2 (10x17x100cm) de manera monolítica, ejecutando las mismas actividades mencionadas anteriormente, respecto a la toma de muestras, medición del asentamiento, vibrado del concreto, fraguado y curado.



Imagen 3.6-1 Viga VR-1 y 2 fundida



## *Viga con refuerzo para aumento de sección (10x17x100cm)*

Después de fundidas, fraguadas y curadas, las vigas de 5x12x100, fundidas sin refuerzo, se procedió después de 48 días con el reforzamiento de 4 de ellas; dos de ellas utilizando el adhesivo epóxico Sikadur®-32 Primer, el cual garantiza una pega perfecta entre concreto fresco y endurecido, según los manuales de su fabricante.



Imagen 3.6-2 Preparación adhesivo epoxico



Imagen 3.6-3 Aplicación adhesivo epoxico

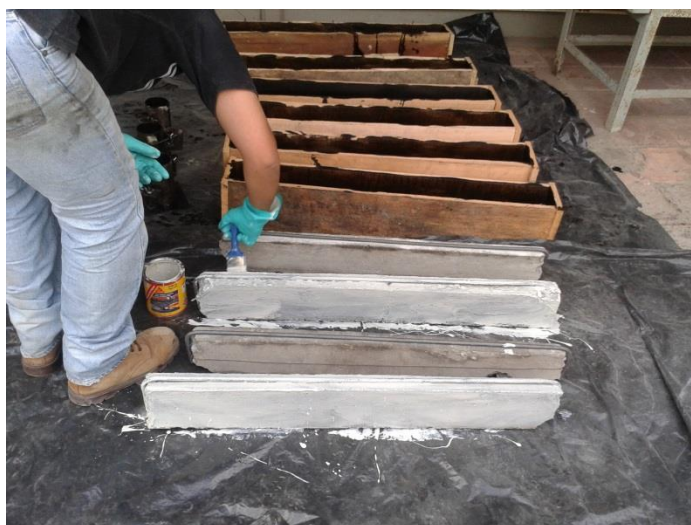


Imagen 3.6-4 Aplicación adhesivo epoxico VC-1 y 2.

Para el caso de la fundición de las dos vigas sin la aplicación del adhesivo, se procedió a limpiar con una brocha gruesa la superficie de la viga endurecida, se

Se realizaron las 13 perforaciones para poder anclar el refuerzo y se procedió una vez se tenía la formaleta elaborada con la viga adentro, a fundir el espacio a aumentar, tomando 3 muestras de cilindros, para medir la resistencia real de concreto vaciado, igualmente se vibró el concreto, se golpeó los laterales de la formaleta para evitar que quedaran bolsas de aire y se dejó fraguar y curar a los 28 días.

Para el caso de la fundición de las dos vigas con la aplicación de adhesivo epóxico Sikadur®-32 Primer, se procedió a escarificar la superficie un poco utilizando una pica y porra, para tener una superficie rugosa que ayude a la adherencia con el adhesivo. Posteriormente se realizaron las perforaciones y los anclajes del refuerzo. Al día siguiente, después de que los anclajes estuvieran firmes, se procedió a preparar la mezcla adhesiva que viene de dos colores para facilitar el control sobre la homogeneidad de la mezcla. Se Vertió completamente el Componente B sobre el Componente A y se mezcló con taladro de bajas revoluciones respetando el máximo de 400 r.p.m. que exige el manual del producto, ejecutando el mezclado hasta obtener una mezcla de color uniforme. Una vez se completó la mezcla, se imprimó las dos caras laterales de las dos vigas y la superior donde se encuentra anclado el concreto para posteriormente instalar el elemento en la formaleta respetando los 2,5 cm que debe haber con respecto a cada cara lateral del elemento imprimado con el adhesivo y así, garantizar que quede en el centro de la viga a incrementar su sección.

Finalmente, una vez realizada la mezcla de concreto respetando las indicaciones establecidas por el laboratorio para garantizar la resistencia de diseño del concreto, se fundió la fôrmatela de 10x17x100cm, ejecutando el vibrado y golpeando los laterales para garantizar la evacuación de las bolsas de aire, se tomaron las respectivas muestras de cilindros y se dejaron fraguar las vigas, ejecutando el respectivo fraguado en las pilas con agua del patio de materiales de la Universidad del Valle.



Imagen 3.6-5 Vigas reforzadas



Imagen 3.6-6 Prueba de asentamiento y cilindros de muestra

### **3.6. MONTAJE Y ENSAYOS DE LABORATORIO.**

En el proceso de montaje para la experimentación de los elementos a escala, los cilindros de concreto y las barras de acero, se utilizó la maquina universal de pruebas ubicada en el laboratorio de sólidos de la Escuela de Ingeniería Civil y Geomática de la Universidad del Valle.

#### **3.6.1. Montaje y pruebas a los cilindros de concreto**

Una vez tomada las muestras de los cilindros y cumplida la edad del elemento desde la fecha de fundición, se realizaron las respectivas pruebas a la compresión siguiendo las establecidas en la norma ASTM C39, ya que la característica que mide la calidad del concreto es su resistencia a la compresión, que se representa como  $f'_c$  e indica la resistencia de 3 probetas cilíndricas de 10 cm de diámetro por 20 cm de altura, ensayadas a los 28 días como se indica en la sección C.5.6.3 de la NSR-10.

El montaje de estas probetas fue sencillo y debido a que son probados bajo carga de compresión, se utilizaron tapas de almohadillas de neopreno en los extremos de los cilindros asegurando una superficie plana y obtener mejores resultados al momento del ensayo además evitar posibles fallas puntuales.





Imagen 3.7.1-1 *Ensayo a la compresión de cilindros*



Imagen 3.7.1-2 *Cilindros ensayados*

### 3.6.2. Montaje y pruebas a las vigas.



Imagen 3.7.2-1 Vigas para ensayo

El procedimiento utilizado para el montaje de las vigas de prueba fue el siguiente:

1. Se ubicó un riel de acero en la parte inferior de las vigas sobre el cual se apoyaran los elementos apoyados a los 5 cm desde los extremos dejando una luz de 90 cm teniendo las viguetas una longitud total de 100 cm.



*Imagen 3.7.2-2 Maquina Universal*

2. En la parte superior se utilizaron dos barras gruesas de acero en el tercio central que son el apoyo de un soporte metálico de ancho adecuado, donde está ubicada la celda de carga que recibe la carga  $P$  aplicada por la máquina universal. Esto se realiza con el fin de repartir la carga puntual ( $P$ ) en los tercios que está dividida la vigueta y para aplicar cargas de  $P/2$  en cada tercio de la luz.

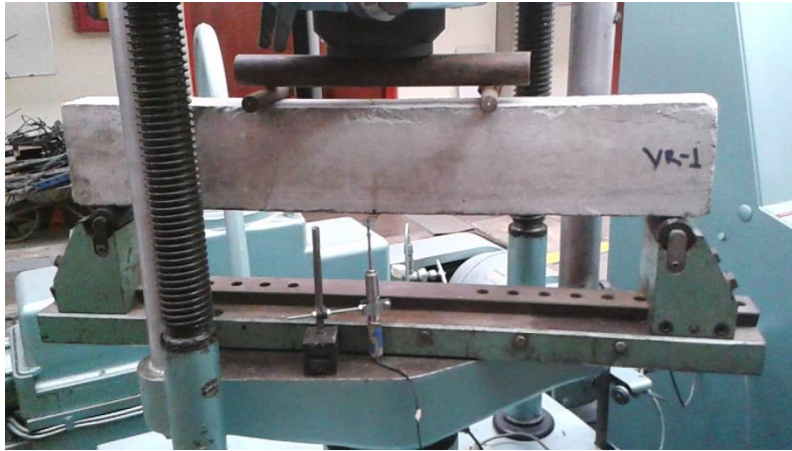




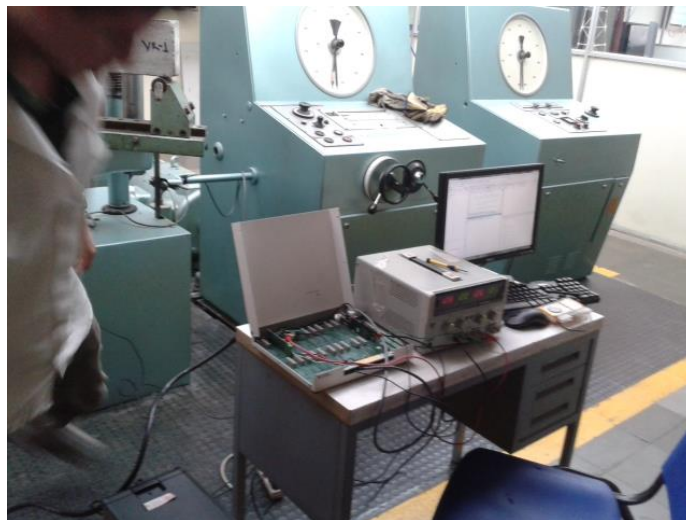
Imagen 3.7.2-3 Montaje de ensayos.

3. En la parte inferior de las vigas se pega una platina de acero la cual hará el contacto con el LVDT el cual mide la deformación de los elementos proporcionalmente se le aplica la carga.

El LVDT y la celda de carga son instrumentos utilizados para la adquisición de datos en el momento del ensayo, estos datos son almacenados en archivos de computador bajo una extensión \*.daq de matlab. Estos datos debieron ser multiplicados por un factor para pasar los datos de la celda de carga a kg ya que los datos entregados por el sensor están dados en voltios, de igual forma los datos del LVDT son multiplicados por un factor para pasarlos a cm.



*Imagen 3.7.2-4 Vigas listas para pruebas*



*Imagen 3.7.2-5 Equipo de medición automatizado*

Después de tener el esquema del montaje listo, se procede a realizar cada una de las pruebas con las diferentes configuraciones de elementos descritas

anteriormente, el laboratorio solo entrega la carga última resistida por el elemento físico además de curvas de esfuerzo-deformación.

Posteriormente serán utilizados para ser analizados y obtener conclusiones finales del comportamiento de las viguetas de concreto reforzado utilizando adhesivos y no utilizándolos, así como las pruebas a la viga de concreto simple.

### **3.6.3. Especificaciones de instrumentos**

Celda de carga: Modelo LCF450, sirve para ensayos a flexión y compresión.

Altura 3.48 cm Diámetro 10.47 cm, peso 1.3 lb, cargas soportadas +/- 15.063 Kgf, material en acero inoxidable.

LVDT: Modelo LD610-1.5, longitud de movimiento +/- 1.5 mm, Altura 101.55 mm,

Diámetro 0.81 mm, peso 38 gr, material en acero inoxidable.

## **4. ANALISIS DE LOS RESULTADOS**

### **4.1. PRESENTACION DE LOS RESULTADOS**

Una vez se concluyeron las pruebas de los elementos vigas, de las probetas o cilindros para las pruebas de compresión para la determinación de la resistencia real de las mezclas de concreto, utilizadas para elaborar los especímenes, así como las pruebas realizadas a las barras de acero, se procedió a procesar la información, analizar los resultados comparando los diferentes elementos para de esta manera obtener las conclusiones respecto a la efectividad de la utilización de los adhesivos epóxicos.

#### **4.1.1. Resultados de las pruebas a compresión de los cilindros.**

A continuación se presentan los resultados de las pruebas a compresión de los cilindros extraídos durante cada una de las fundiciones realizadas:

- Primera fundición: vigas de sección 5x12x100cm (fueron 6 und)

Para esta fundición como se mencionó en el punto 3.6, se tomaron 3 muestras debido a que la fundición de las 6 vigas se ejecutó en el mismo día y arrojaron los siguientes resultados:

**Tabla 4.1.1-1.**

<b>Primera Mezcla vigas de 5x12x100cm</b>	<b>f'c (kg/cm<sup>2</sup>)</b>
<b>Cilindro No 1</b>	235,55
<b>Cilindro No 2</b>	239,11
<b>Cilindro No 3</b>	235,01
<b>Promedio de resistencia</b>	<b>236,56</b>

- Segunda fundición: vigas de sección 10x17x100cm fundidas monolíticamente

En esta fundición se utilizó la misma mezcla que para las anteriores vigas y además se fundieron de manera paralela, por lo que las muestras que se tomaron fueron los mismos tres cilindros que se tomaron anteriormente por lo que los resultados anteriores son los representativos para estas vigas.

**Tabla 4.1.1-2**

<b>Segunda Mezcla vigas de 10x17x100cm</b>	<b>f'c (kg/cm<sup>2</sup>)</b>
<b>Cilindro No 1</b>	235,55
<b>Cilindro No 2</b>	239,11

<b>Cilindro No 3</b>	235,01
<b>Promedio de resistencia</b>	<b>236,56</b>

- Tercera y última fundición: vigas de sección 10x17x100cm para el respectivo incremento de sección y reforzamiento.

Para esta fundición, debido que se utilizó la misma mezcla de concreto, solo se extrajo 3 muestras de la mezcla y los resultados después de las pruebas de resistencia a la compresión realizadas a los cilindros muestran los siguientes resultados:

**Tabla 4.1.1-3**

<b>tercera Mezcla vigas de 10x17x100cm</b>	<b>f'c (kg/cm<sup>2</sup>)</b>
<b>Cilindro No 1</b>	213,99
<b>Cilindro No 2</b>	215,31
<b>Cilindro No 3</b>	218,2
<b>Promedio de resistencia</b>	<b>215,83</b>

Como se muestra en la tabla anterior la resistencia del concreto fue mayor a la de diseño, esto indica que la mezcla realizada en sitio fue acorde a las especificaciones del concreto y nos puede generar más seguridad frente a los resultados esperados de los ensayos de las vigas.

#### 4.1.2. Resultados de las pruebas de tensión de las barras de acero

Se utilizaron 2 probetas por cada tipo de acero (dos para las longitudinales y otras dos para el refuerzo a cortante) y se promedió el valor para tener la resistencia del acero.

A continuación se muestra en la tabla los resultados de las pruebas realizadas a tensión para determinar el esfuerzo de fluencia  $f_y$  para cada tipo de barra:

**Tabla 4.1.2-1**

<b>ACERO REFUERZO TRANSVERSAL</b>		
<b>Barra Grafilada de <math>\Phi</math> 5 mm</b>	<b>Carga de Fluencia (Kg)</b>	<b>Carga de Falla (Kg)</b>
Muestra 1	535	920
Muestra 2	535	915

Promedio de Cargas (Kg)	535	917,5
-------------------------	-----	-------

Carga de Fluencia (Kg)	535
Área de barra de acero (cm <sup>2</sup> )	0,125663706
<b>Esfuerzo de Fluencia (fy)[kg/ cm<sup>2</sup>]:</b>	<b>4257,394728</b>

**Tabla 4.1.2-2**

<b>ACERO REFUERZO TRANSVERSAL</b>		
<b>Barra de <math>\Phi</math> 9,5 mm</b>	<b>Carga de Fluencia (Kg)</b>	<b>Carga de Falla (Kg)</b>
Muestra 1	2.990	4.400
Muestra 2	3.000	4.510
Promedio de Cargas (Kg)	2.995	4.455

Carga de Fluencia (Kg)	2995
Área de barra de acero (cm <sup>2</sup> )	0,708821842
<b>Esfuerzo de Fluencia (fy)[kg/ cm<sup>2</sup>]:</b>	<b>4225,321259</b>



En conclusión el acero se comportó de la manera esperada para el tipo de acero utilizado, acero corrugado grado 60, el cual tiene como esfuerzo de fluencia 4200 Kg/cm<sup>2</sup> y se observa que los resultados obtenidos durante las pruebas son mayores a los utilizados en el diseño de las vigas utilizadas en los ensayos, lo cual nos da certeza que hay muy altas probabilidades de que las vigas resistan una carga mayor a la de diseño.

#### 4.1.3. Resultados de los ensayos de las vigas

Para la ejecución de los ensayos de laboratorio se construyeron como se mencionó anteriormente 2 vigas para cada configuración a evaluar, las cuales se nombraron como relacionamos a continuación

##### ***Viga con refuerzo fundida monolíticamente (10x17x100cm)***

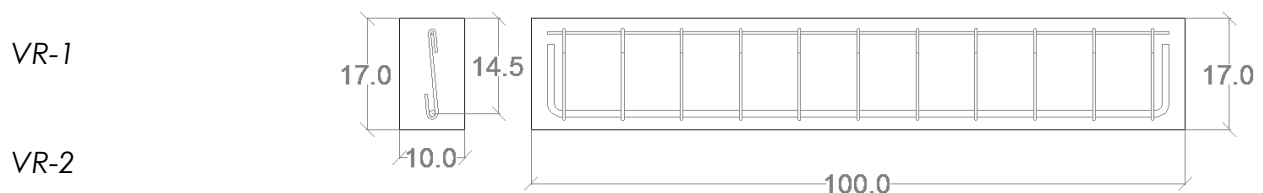


Ilustración 4.1.3-1

##### ***Viga con refuerzo para aumento de sección (10x17x100cm) sin aplicación de adhesivo epóxico***

VS-1 (Viga Reforzada Sin adhesivo – 1)

VS-2 (Viga Reforzada Sin adhesivo – 2)

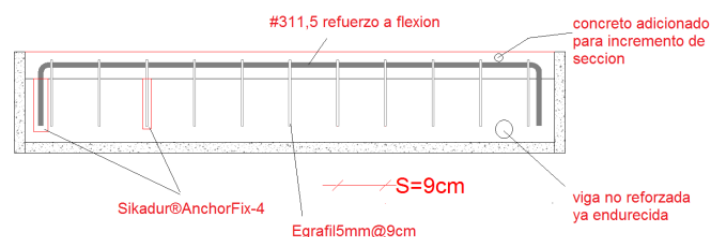


Ilustración 4.1.3-2

**Viga con refuerzo para con aumento de sección (10x17x100cm) con aplicación de adhesivo epóxico**

VC-1 (Viga Reforzada Con adhesivo – 1)

VC-2 (Viga Reforzada Con adhesivo – 2)

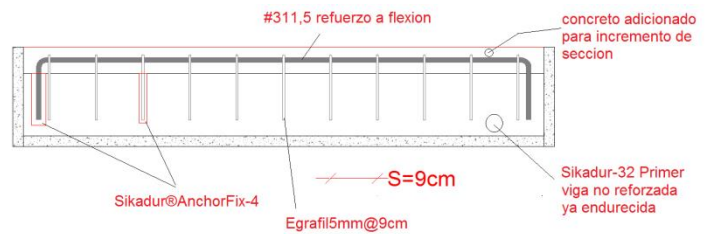
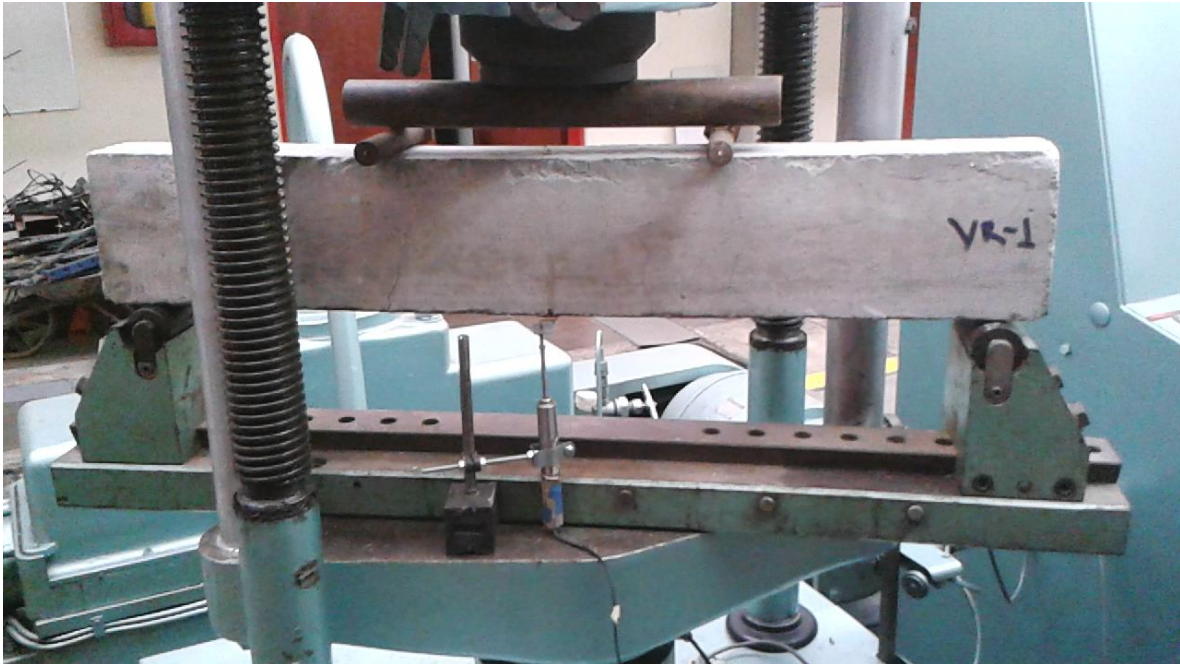


Ilustración 4.1.3-3

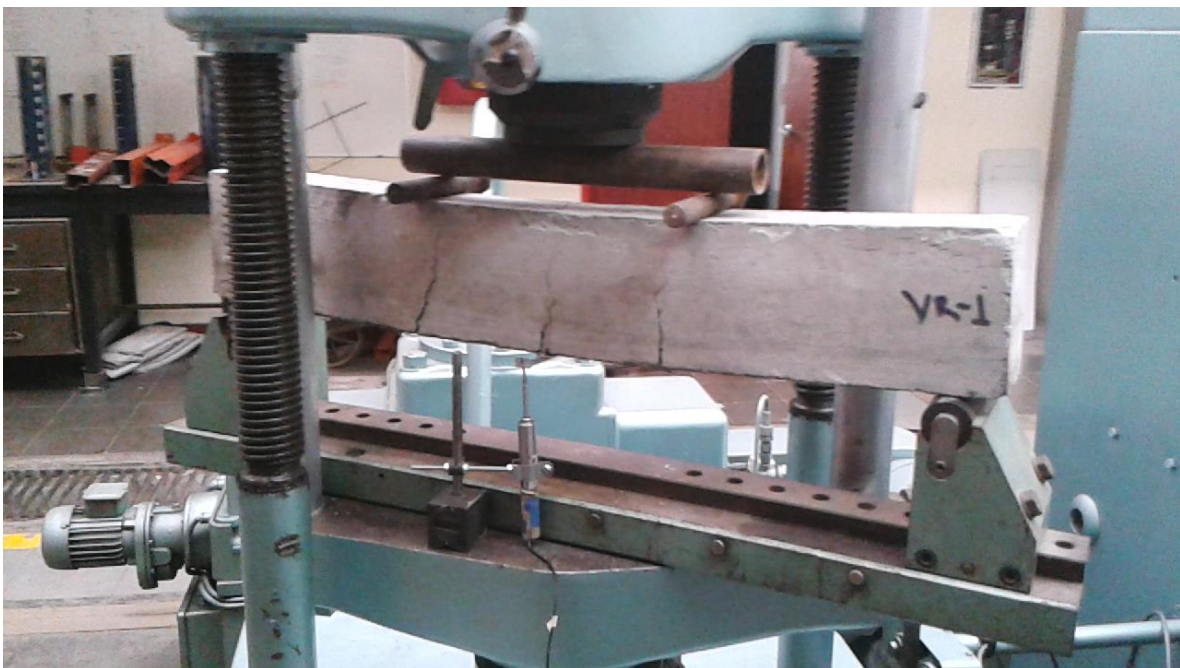
Con los anteriores elementos, se llevaron a cabo los 6 ensayos a flexión para lograr obtener los 3 resultados promedio con los cuales se realizara las comparaciones y de esta manera construir las conclusiones.

**4.1.3.1. Viga con refuerzo fundida monolíticamente (10x17x100cm) VR**

La viga tuvo un comportamiento ajustado a los parámetros planteados en los diseños previos. A continuación mostramos los resultados de la resistencia Última de las dos vigas (VR-1 e VR-2) y el respectivo cálculo de su promedio:



*Imagen 4.1.3.1-1 Viga VR-1 al inicio de la prueba*



*Imagen 4.1.3.1-2 Viga VR-1 al finalizar la prueba*



VR-1 =  $P_u = 4.200 \text{ Kg}$

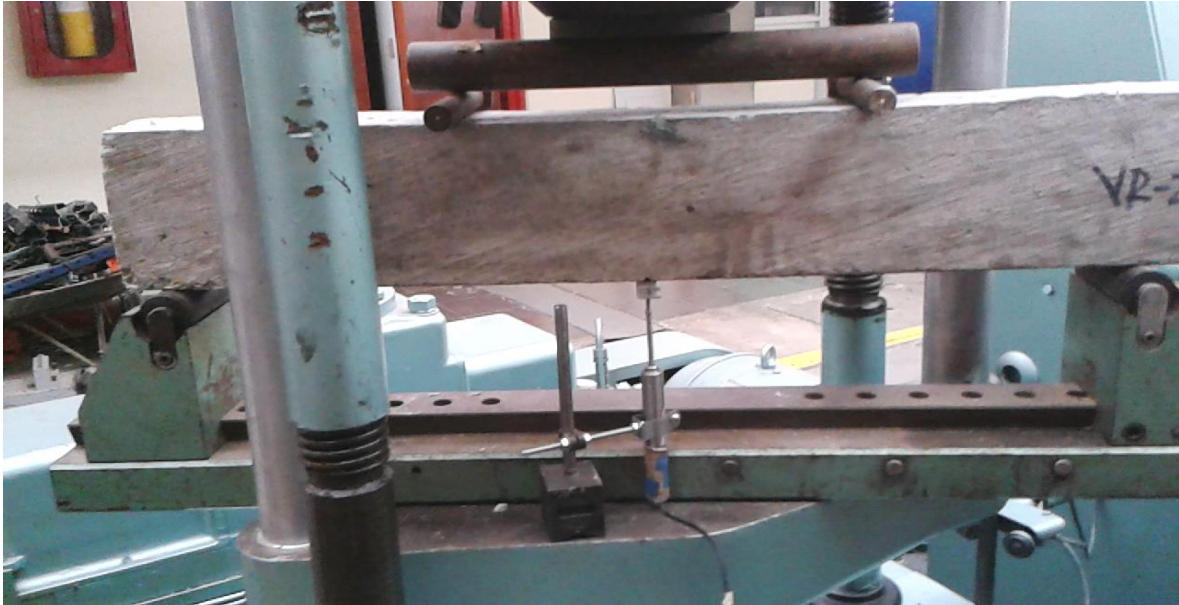


Imagen 4.1.3.1-3 Viga VR-2 al inicio de la prueba

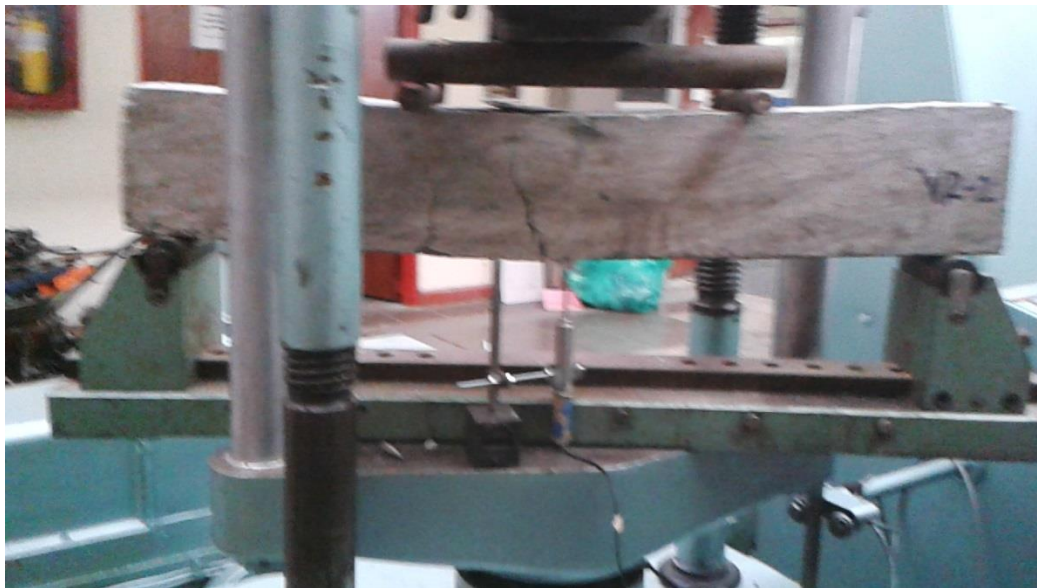


Imagen 4.1.3.1-4 Viga VR-2 al Finalizar la prueba

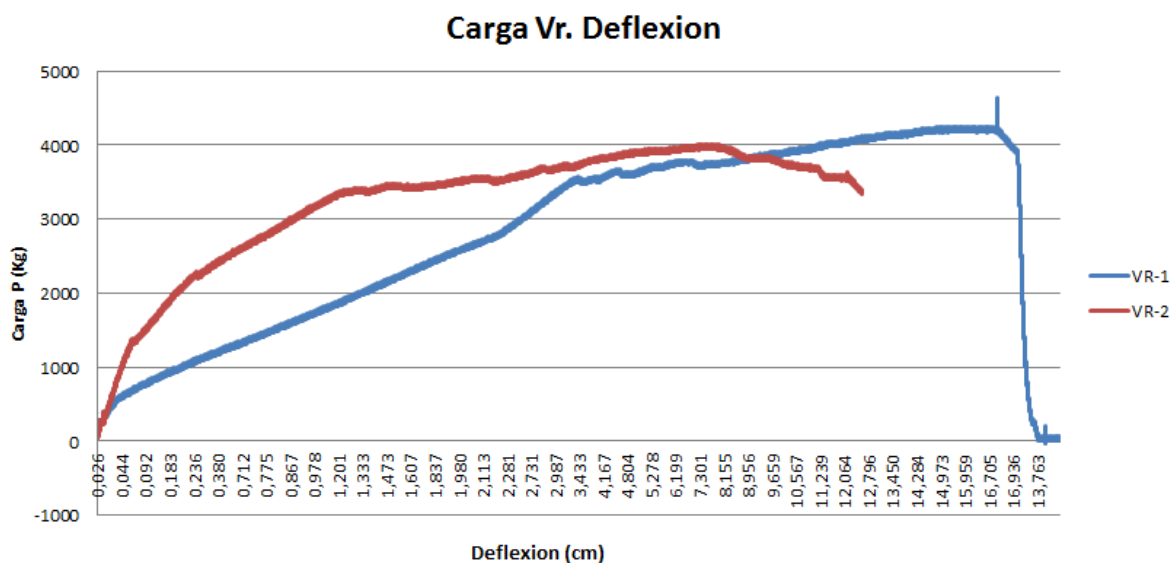
VR-2 =  $P_u = 3.950 \text{ kg}$

Promedio =  $P_{u\text{experimental}} = 4.075 \text{ Kg}$

$P_{\text{diseño}} = P_{u\text{Analítico}} = 2.698,19 \text{ Kg}$

El promedio de la resistencia de la mezcla de concreto de este elemento fue de  $236,56 \text{ kg/cm}^2$ , el cual fue factor importante para la resistencia del elemento.

Se observó una deflexión y grietas normales, según se informó la primera grieta se presenta en el centro de la luz y con una carga aproximada de  $2.500 \text{ kg}$ , y a partir de estas se desarrollan las siguientes fisuras por tensión diagonal. Finalmente la viga falla en el tercio central dejando expuesto el refuerzo, lo cual indica que la falla se presenta por el desprendimiento del concreto por su poca o nula resistencia a la tracción.



Gráfica 4.1.3.1-1 Carga Vs Deflexión VR

#### **4.1.3.2. Viga con refuerzo para aumento de sección (10x17x100cm) sin aplicación de adhesivo epóxico**

Estas vigas son el resultado de incrementar la sección de las viguetas iniciales, pero sin la aplicación del adhesivo epóxico. A continuación se muestran los resultados de la resistencia última de las dos vigas (VS-1 y VS-2) y el respectivo cálculo de su promedio:

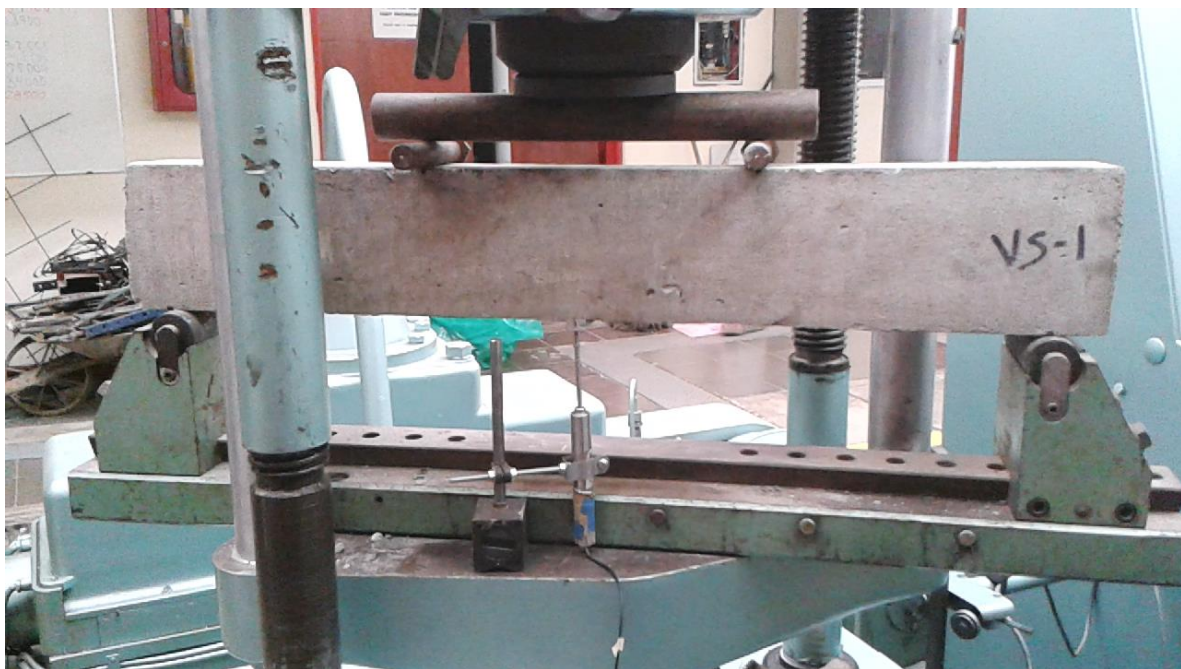


Imagen 4.1.3.2-1 Viga VS-1 al inicio de la prueba





Imagen 4.1.3.2-2 Viga VS-1 al Finalizar la prueba

VS-1 =  $P_u = 2.500\text{Kg}$



Imagen 4.1.3.2-3 Viga VS-2 al inicio de la prueba



Imagen 4.1.3.2-4 Viga VS-2 al Finalizar la prueba

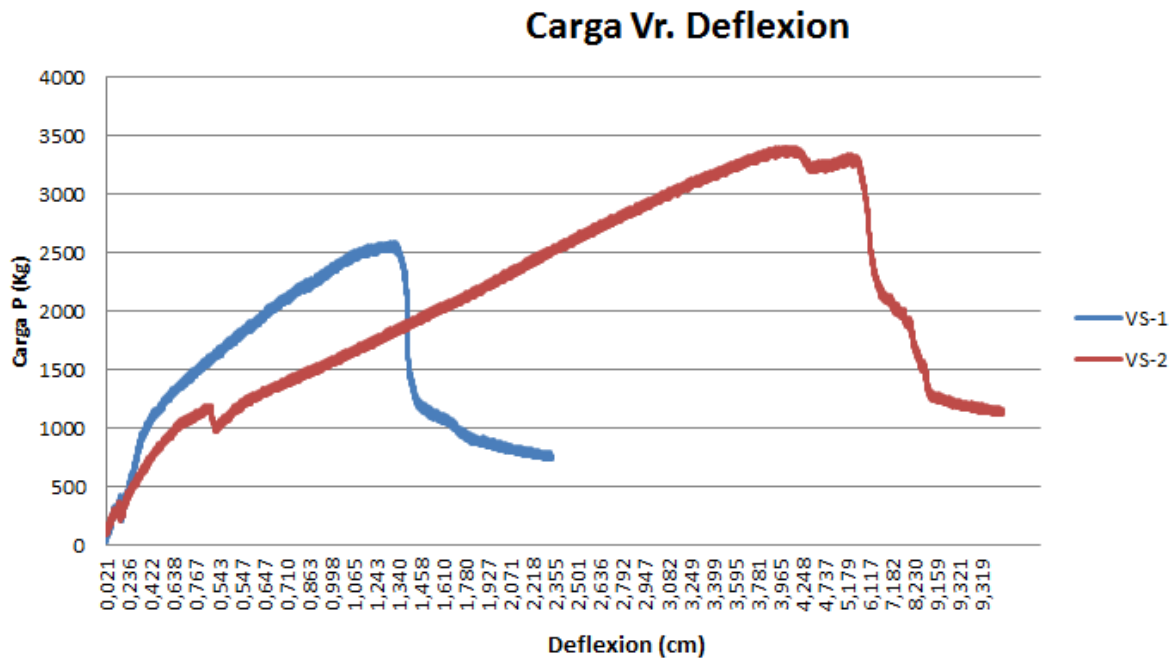
$VS-2 = P_u = 3.300 \text{ kg}$

Promedio =  $P_{u\text{experimental}} = 2.900 \text{ Kg}$

$P_{\text{diseño}} = P_{u\text{Analítico}} = 2.698,19\text{Kg}$

El comportamiento de estas probetas fue similar **entre ellas**, debido a que ambas presentaron falla a cortante, una en el tercio izquierdo y la otra en el tercio derecho, presentando grietas a  $45^\circ$ , lo que diagnostica una falla por cortante. Las primeras grietas aparecieron con la carga  $P = 2.600 \text{ Kg}$  en promedio.



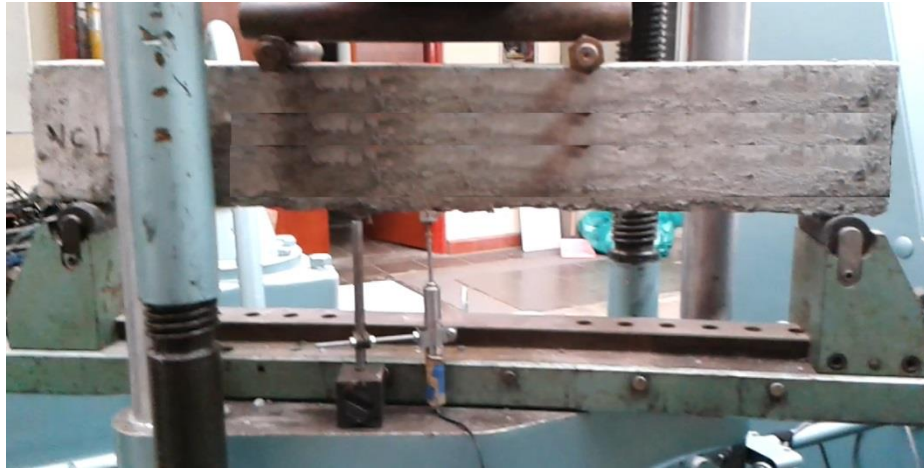


Gráfica 4.1.3.2-1 Carga Vs Deflexión VS

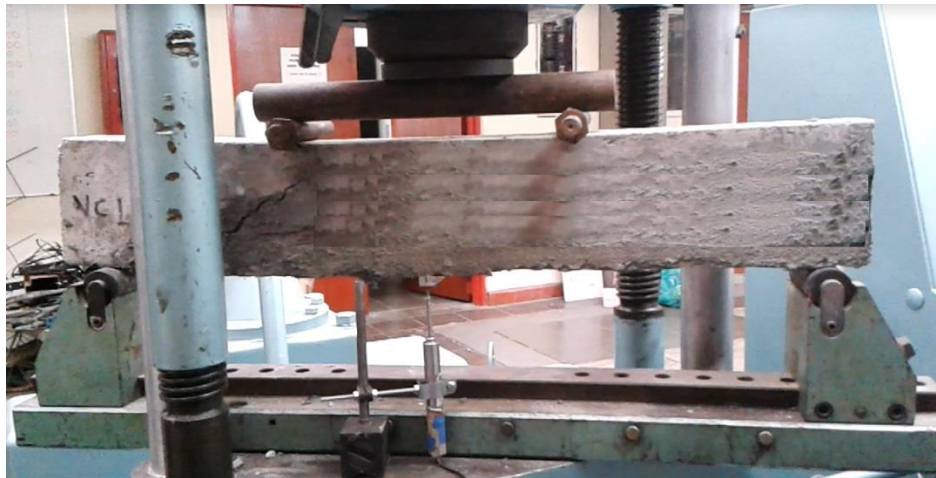
#### 4.1.3.3. Viga con refuerzo para aumento de sección (10x17x100cm) con aplicación de adhesivo epóxico

La viga tuvo un comportamiento muy parecido a la de la viga VR, pero no superando la resistencia de esta debido a que sus materiales resistentes presentaban una mejor resistencia.

Los resultados reportados de las dos últimas pruebas para las vigas que se les aplico el adhesivo epóxico (VC-1 y VC-2) son las siguientes:



*Imagen 4.1.3.3-1 Viga VC-1 al Inicio de la prueba*



*Imagen 4.1.3.3-2 Viga VC-1 al Finalizar la prueba*

VC-1 =  $P_u$  = 4.000 Kg

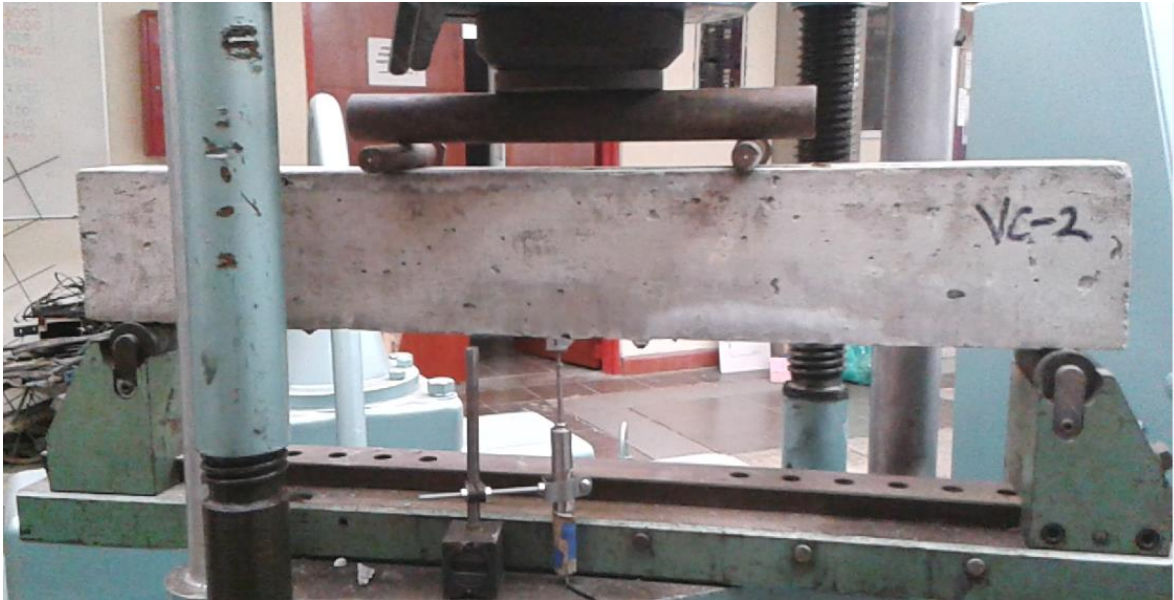


Imagen 4.1.3.3-3 Viga VC-2 al Inicio de la prueba

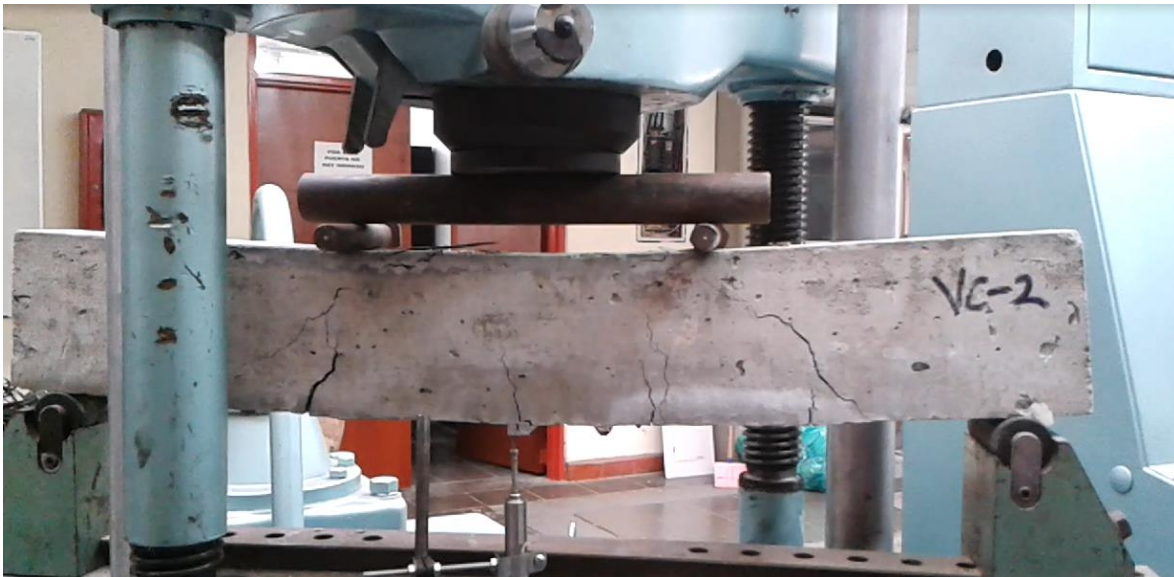


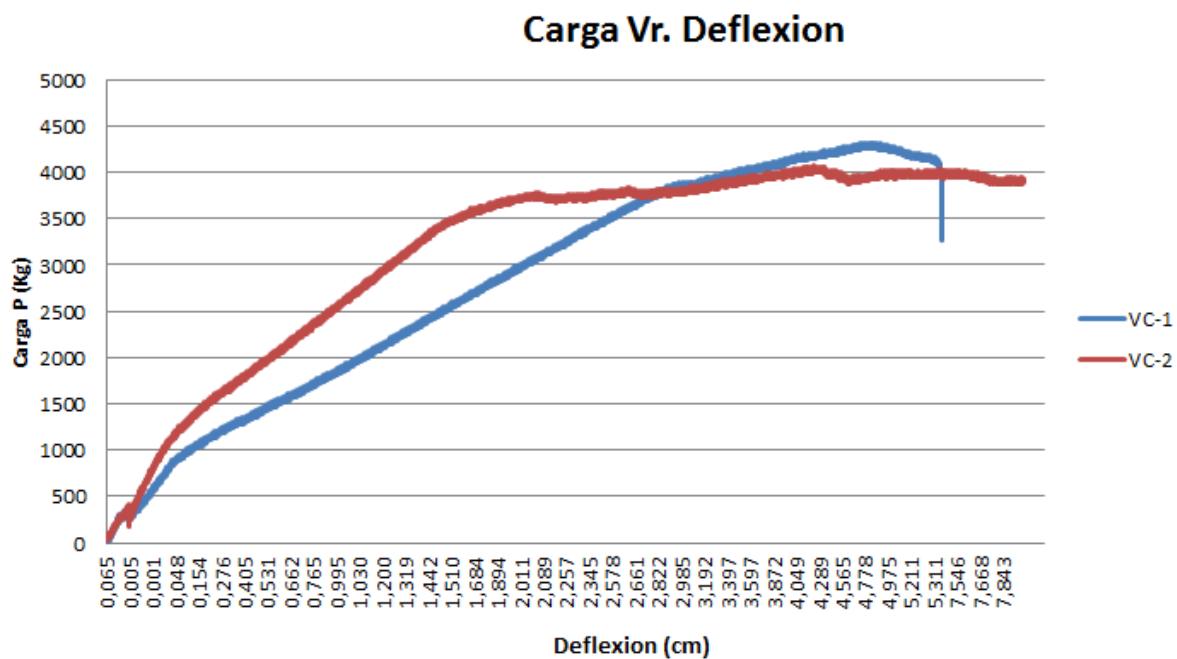
Imagen 4.1.3.3-4 Viga VC-2 al finalizar la prueba

VC-2 =  $P_u$  = 4.200 kg

Promedio =  $P_{U_{experimental}} = 4.100 \text{ Kg}$

$P_{diseño} = P_{U_{Analítico}} = 2.698,19 \text{ Kg}$

Esta probeta tuvo mejor resultado, similar a la de la viga VR, debido a la utilización del adhesivo epóxico, el cual hizo que el comportamiento de la viga reforzada fuera similar a la de una viga fundida monolíticamente.



Gráfica 4.1.3.3-1 Carga Vs Deflexión VC

## 4.2. COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS

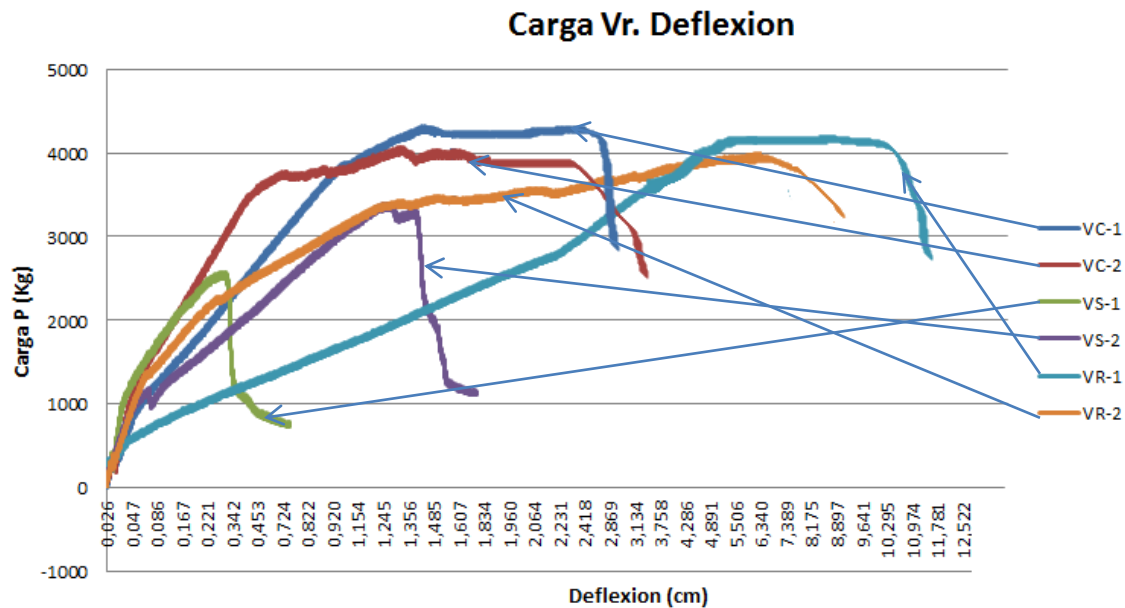


Ilustración 4.2-1

Tal como lo muestra el grafico comparativo, la viga a la que se le aplico el puente de adherencia (VC), se comportó estructuralmente similar a la viga reforzada que fue fundida monolíticamente (VR), mientras que la que no tuvo este tratamiento previo (VS), alcanza su carga máxima muy rápidamente y con esto su falla temprana.

Se evidencia igualmente que la viga a la que no se le aplico puente de adherencia, aunque tuvo un comportamiento estructural muy deficiente, alcanza la resistencia última de diseño.

Observando lo anterior, y comparándolo con los resultados obtenidos con las vigas VR y VC, se puede concluir que el puente de adherencia provoca el incremento en la resistencia última en un 50% más respecto con una a que no se le aplique el puente de adherencia, pero aunque no se aplique, el comportamiento estructural de la viga VS obtiene resistencia última dentro de la esperada analíticamente.



## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. Según se evidencio en las consultas a los constructores de sus experiencias en reforzamientos de estructuras, estos tienen buenas practicas a la hora de ejecutar reforzamientos, evidenciando que aplican puentes de adherencia o adhesivos epóxicos cuando realizan aumentos de la sección transversal de una viga, para garantizar la unión de concretos de diferentes edades, cumpliendo las especificaciones técnicas que elabora el diseñador, el cual sugiere la utilización de estos.
2. Según los resultados obtenidos después de las pruebas de las distintas probetas de elementos viga, se puede concluir la importancia de incorporar un adhesivo epóxico a la hora de incluir concreto a un elemento de concreto ya endurecido, y con esto procurar que la sección de concreto se comporte como un elemento compuesto, es decir con dos tipos de materiales distintos, y así evitar que se pierda la capacidad resistente para la que fue diseñado.
3. La incorporación de adhesivos epóxicos a la hora de encamisar vigas con concreto nuevo, resulta muy efectiva debido a que la resistencia última obtenida es muy similar a la de un elemento viga fundido monolíticamente.
4. Es muy importante el seguimiento profesional, durante los procesos constructivos, debido a que si no se garantiza la ejecución de la aplicación del adhesivo epóxico a la hora de reforzar vigas de concreto por el método de aumento de su sección transversal, es muy probable que la resistencia de

dicho elemento no sea la estimada en el diseño estructural, lo que hace que la estructura sea insegura para su uso.

5. La literatura, o los estudios que actualmente se tienen para el cálculo y diseño de los elementos de una estructura, son muy aproximados a la realidad, según se puede comparar en esta investigación.
6. La utilización de puentes de adherencia como adherentes epóxicos es una buena opción con la que cuenta el constructor para enfrentarse a los problemas de uniones entre concreto nuevo y concreto viejo, donde en este caso basados en los resultados finales de la investigación es un factor necesario para seguridad del constructor y los usuarios.
7. Se evidencio que la viga sin puente de adherencia presento un comportamiento frágil (o no dúctil) pues una vez alcanza su máxima resistencia, hay perdida inmediata de la misma y no se alcanzan deformaciones adicionales. Este proyecto tuvo limitantes en cuanto a antecedentes de estudios acerca de los ensayos de este tipo de reforzamiento, lo observado durante la realización de la investigación surgieron variables que no estaban contempladas en el enfoque inicial del proyecto, la cual deja una puerta abierta para estudios futuros en cuanto a la evaluación de la efectividad de diferentes adhesivos epóxicos en vigas o viguetas para sistemas de losas convencionales, donde se pueda determinar que pasa realmente con su comportamiento.



8. Se deja abierto para futuras investigaciones relacionadas con la que se expone en esta, debido a la amplia gama de adhesivos que existen en el mercado.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

**Oviedo Sarmiento, Ricardo Ramón. 2009.** Metodos de reforzamiento en edificios de concreto armado. Peru : UNI, 2009.

**ACI, El instituto americano del concreto . 1999.** comité 440-F. 1999.

*Análisis del comportamiento de una viga de concreto armado, ensayada a flexión, reforzada con barras de fibra de carbono.* **Guzman Rosales, Luis Rodolfo. 2008.** Guatemala : Universidad de San Carlos, 2008.

**Archila Ortiz, Gustavo Adolfo. 2007.** *Evaluación Sobre Adherencia Entre Concreto Antiguo y Concreto Nuevo con Dos Tipos de Epóxicos.* Guatemala : Universidad San Carlos de Guatemala, 2007.

**ASTM.** C 881-90 tipo II, V, Grado 2, Clase B y C. .

**Castillo Escallon , Bryan Alfonso y Lopez Zuñiga, Mauricio. 2010.** *Evaluación del comportamiento de viguetas de sistemas de losas aligeradas en concreto reforzado valorando el efecto de la junta fría.* Cali, Colombia : Universidad del Valle, 2010.

**Gere, James M. 2006.** *Mecanica de Materiales.* s.l. : Thomson, 2006.

**Guerrero, Patricia y Martinez, José J. 2007.** *Fundamentos de Concreto reforzado.* Cali : Universidad Javeriana, 2007.

*Joins in Concrete Construction.* **ACI. 2001.** USA : s.n., 2001.

**López Corona, José Roberto. 2008.** *Análisis experimental en el uso de un adhesivo para la unión de concreto con edades distintas.* Cholula, Puebla, México : Universidad de las Américas Puebla, 2008.

**Luizaga Patiño, Alfredo M. 2005.** *Comportamiento mecanico de vigas de hormigon armado reforzadas con bandas encoladas con resinas epoxidicas.* Madrid, España : Universidad Politecnica de Madrid, 2005.

**Materials, American Society Testing. 1999.** Manual de normas. Estados Unidos : s.n., 1999. Vol. 4.02.

**Mccormarc, Jack C. 2002.** Diseño de Concreto Reforzado. s.l. : Alfaomega, 2002.

**Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (Colombia). 2010.** *Reglamento Colombiano de Construccion Sismoresistente NSR-10.* Bogota D.C. : s.n., 2010.

**Nilson, Arthur. 2008.** Diseño de Estructuras de Concreto. s.l. : Mc Graw Hill, 2008.

**Padilla Ramirez, Amando , Flores Bustamante, Antonio y Panamá Armendariz, Iván . 2007.** *Evaluación de propiedades adhesivas y mecánicas de laminados epóxicos fibra de vidrio como refuerzos externos en vigas de concreto.* s.l. : UAM Azcapotzalco, 2007.

*Rehabilitacion Sismica de Edificios Existentes.* **Bertero, V. 1997.** Caracas, Venezuela : Terremoto de Caracas 30 años despues, 1997.

*Requisitos de reglamento para concreto estructural y comentarios.* **Wigth, James**

**K. 2008.** 2008. ACI 3185-08.

**Rochel Awad, Roberto. 2007.** *Hormigon Reforzado.* Medellin, Colombia : Fondo Editorial Universidad EAFIT, 2007.

**SIKA. 2010.** El manual técnico de construcción. s.l. : Sika, 2010.

## INDICE DE ILUSTRACIONES

ILUSTRACION 2.2-1.....	19
ILUSTRACIÓN 2.2-2.....	20
ILUSTRACION 3.1-1.....	23
ILUSTRACION 3.1-2.....	23
ILUSTRACION 3.1-3.....	24
ILUSTRACION 3.1-4.....	24
ILUSTRACION 3.1-5.....	25
ILUSTRACION 3.1-6.....	25
ILUSTRACION 3.1-7.....	27
ILUSTRACION 3.1-8.....	28
ILUSTRACION 3.3-1.....	29
ILUSTRACION 3.3-2.....	29
ILUSTRACION 3.3-3.....	29
ILUSTRACION 3.3-4.....	30

ILUSTRACION 3.5-1.....	39
ILUSTRACION 3.5-2.....	40
ILUSTRACION 3.5-3.....	41
ILUSTRACION 4.2-1.....	73

## INDICE DE IMAGENES

IMAGEN 3.5-1.....	36
IMAGEN 3.5-2.....	37
IMAGEN 3.5-3.....	38
IMAGEN 3.5-4.....	40
IMAGEN 3.5-5.....	42
IMAGEN 3.5-6.....	42
IMAGEN 3.5-7.....	43
IMAGEN 3.6-1.....	44
IMAGEN 3.6-2.....	45
IMAGEN 3.6-3.....	46
IMAGEN 3.6-4.....	46
IMAGEN 3.6-5.....	48
IMAGEN 3.6-6.....	48
IMAGEN 3.7.1-1.....	50

IMAGEN 3.7.1-2.....	50
IMAGEN 3.7.2-1.....	51
IMAGEN 3.7.2-2.....	52
IMAGEN 3.7.2-3.....	53
IMAGEN 3.7.2-4.....	54
IMAGEN 3.7.2-5.....	54
IMAGEN 4.1.3.1-1.....	63
IMAGEN 4.1.3.1-2.....	63
IMAGEN 4.1.3.1-3.....	64
IMAGEN 4.1.3.1-4.....	64
IMAGEN 4.1.3.2-1.....	66
IMAGEN 4.1.3.2-2.....	67
IMAGEN 4.1.3.2-3.....	67
IMAGEN 4.1.3.2-4.....	68
IMAGEN 4.1.3.3-1.....	70



IMAGEN 4.1.3.3-2.....	70
IMAGEN 4.1.3.3-3.....	71
IMAGEN 4.1.3.3-4.....	71

**INDICE DE TABLAS**

TABLA 4.1.1-1.....	57
TABLA 4.1.1-2.....	57
TABLA 4.1.1-3.....	58
TABLA 4.1.2-1.....	59
TABLA 4.1.2-2.....	60

## INDICE DE GRAFICOS

GRÁFICA 4.1.3.1-1.....	65
GRÁFICA 4.1.3.2-1.....	69
GRÁFICA 4.1.3.3-1.....	72

## NOTACIÓN Y DEFINICIONES

$n$ : Relación Modular

$E_s$ : Modulo de elasticidad del Refuerzo y del acero estructural

$E_c$ : Modulo de elasticidad del concreto

$A_{t1}$ : Área de la sección transformada

$A_c$ : Área bruta del concreto

$A_s$ : Área bruta del refuerzo

$A_g$ : Área total de la sección transversal

$F_{ct}$ : Esfuerzo del concreto a tracción

$M_r$ : Modulo de rotura del concreto

$F'_c$ : Máximo esfuerzo del concreto a compresión

$Y_c$ : Distancia al eje neutro del área a compresión

$Y_t$ : Distancia al eje neutro del área a tracción

$H$ : Altura de la sección transversal

$d$ : distancia desde la fibra extrema en compresión hasta el centroide del refuerzo longitudinal en tracción

$I_t$ : Momento de inercia de la sección transformada

$b_w$ : Base de la sección transversal

$M_{ct}$ : Momento crítico a tracción

$P_{cr}$ : Carga critica

$W_d$ : Peso propio del elemento

$L$ : luz entre apoyos

$M_c$ : Momento a compresión

$M_s$ : Momento a tracción

$P_c$ : Carga máxima a compresión

$P_s$ : Carga máxima a tracción

$\rho$ : Cuantía de acero

$\beta_1$ : factor que relaciona la profundidad de bloque rectangular equivalente de esfuerzos de compresión con la profundidad del eje neutro

$V_u$ : Cortante máxima resistente

$V_c$ : Cortante del concreto

$V_s$ : Cortante del refuerzo

$\lambda$ : factor de modificación que tiene en cuenta las propiedades mecánicas reducidas del concreto de peso liviano, relativa a los concretos de peso normal de igual resistencia a la compresión

$A_v$ : Área del refuerzo transversal

$S$ : Espaciamiento del refuerzo transversal